

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO FINO
AL ADICIONARLE 3% DE CAL Y DIFERENTES PORCENTAJES DE
CONCRETO RECICLADO.

ÁLVARO ANDRÉS CUESTA CHALPARIZÁN



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
JULIO, 2014

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO FINO
AL ADICIONARLE 3% DE CAL Y DIFERENTES PORCENTAJES DE
CONCRETO RECICLADO.

ÁLVARO ANDRÉS CUESTA CHALPARIZÁN

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero civil

Prof. MANOLO GALVÁN CEBALLOS PhD
DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
JULIO, 2014

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por brindarme la oportunidad de cada día avanzar en la formación y superación profesional, a mi familia por el esfuerzo, dedicación, apoyo, el ejemplo y consejos que diariamente me brindaron, porque estos fueron los pilares fundamentales para lograr esta meta.

A la Universidad del Valle, a los laboratoristas, Ingeniero Carlos Manrique y su ayudante Noé Duran, por su ayuda y colaboración en los ensayos de laboratorio de esta investigación.

Al Profesor Ingeniero Manolo Galván Ceballos, por su colaboración, orientación, acompañamiento durante todo este proceso de investigación.

A todos mis compañeros, amigos y personas que de alguna forma contribuyeron a mi formación profesional y a la realización de este sueño.

RESUMEN

Uno de los factores más importantes que determinan la calidad y seguridad de una estructura, es el comportamiento del suelo donde esta se construye, para el caso de bases, sub-bases de pavimentos, terraplenes, el material que se utiliza es un suelo fino o granular este material es seleccionado y en su mayoría es extraído de canteras y ríos cercanos al sitio de la obra, los cuales dependiendo de la intensidad con que se los explote se irán deteriorando y afectaran directamente el medio ambiente.

La dinámica comercial actual de países como Colombia tiene como aspecto característico el crecimiento poblacional e industrial continuo, ello con lleva al aumento de construcciones y las renovaciones de infraestructura necesaria para su funcionamiento. Una consecuencia directa de esta situación es el aumento de material proveniente de procesos de construcción, remodelaciones y demoliciones, los cuales pueden significar una amenaza ambiental, ya que en la mayoría de los casos este material simplemente es recolectado transportado y puesto a disposición.

Por esta razón existe la tendencia a disminuir la utilización de materiales explotados de canteras y ríos mediante la utilización de materiales no convencionales que puedan remplazar de forma parcial o total el material de relleno utilizado.

El presente proyecto, realizó una investigación exploratoria, para evaluar propiedades de un limo de alta plasticidad MH al adicionarle 3% de cal y diferentes porcentajes de concreto reciclado. El suelo se caracterizó mediante ensayos de laboratorio: análisis granulométrico por tamizado y por hidrómetro, límites de consistencia, Relación de Soporte California (CBR), proctor modificado, Gravedad específica, compresión inconfiada, Permeabilidad. Se caracterizó el concreto reciclado mediante análisis granulométrico por tamizado y por hidrometría, gravedad específica y porosidad. Luego de esto se adiciono 5, 10, 15 y 20% de concreto reciclado más 3% de cal en cada dosificación. Con cada mezcla de suelo, concreto y cal se realizó: límites de plasticidad, proctor modificado, compresión inconfiada y permeabilidad, esto con el fin de poder comparación con los resultados iniciales.

Palabras claves: Estabilización de suelos, Concreto reciclado, Resistencia de suelos, Caracterización. Densidad seca máxima.

ABSTRACT

One of the Most Important factors That determine the quality and safety of a structure is the behavior of the soil where it is built, in the case of foundations, pavement subgrades, embankments, the materials used is a fine soil or this granular material is selected and is mostly Extracted from quarries and rivers near the work site, Which Depending on the intensity with the exploit Which is deteriorating and will Directly Affect the environment.

The current market dynamics in countries country like Colombia has the characteristic appearance and continued population growth industry, This leads to an Increase in construction and renovations of ITS infrastructure needed for operation. A direct Consequence of this is the Increase in process materials from construction, remodeling and demolition, Which May mean an environmental threat, Because in most cases This equipment is collected and made available simply Transported.

For This reason there is a tendency to reduce the use of rivers and quarries exploited through the use of unconventional materials That can replace part or all of the filler materials used.

This project, Conducted an exploratory study to evaluate-the effect of recycled concrete (RC) and lime on a fine subgrade soil type, classified ACCORDING to the Unified soil classification as a high plasticity silt MH system. This equipment was Characterized by laboratory tests: Sieve analysis by sieving and hydrometer, consistency limits, California Bearing Ratio (CBR), modified Proctor, Specific Gravity, unconfined compression, permeability with consolidometer. We Also Characterized the recycled concrete by sieve analysis and hydrometer, specific gravity and porosity. This was added after 5, 10, 15 and 20% recycled concrete plus 3% lime at each dosage. Each mixture of soil, concrete and lime was made: limits of plasticity modified proctor, unconfined compression and permeability, este order to compare With the initial results.

Keywords: Soil Stabilization, Concrete recycling, soil resistance, characterization..

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	11
1. EL PROBLEMA.....	12
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3. OBJETIVO GENERAL	13
1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.6. ANTECEDENTES DEL USO DEL CONCRETO RECICLADO	14
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. EL SUELO	19
2.1.1. COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS.	19
2.1.1.1. Suelos Residuales	19
2.1.1.2. Suelos Transportados	20
2.1.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS.....	20
2.1.2.1. Resistencia de los suelos.....	20
2.1.2.2. Definición de suelos plásticos.....	21
2.1.3. CLASIFICACION DE LOS SUELOS	21
2.1.3.1. Sistema de clasificación de suelos SUCS (ASTM D-2487).	21
2.1.4. CONSISTENCIA DEL SUELO	23
2.1.4.1. Índice de plasticidad (IP).	23
2.1.4.2. Carta de plasticidad.....	23
2.1.5. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.	24
2.1.5.1. Definición de estabilización.....	24
2.1.5.2. Ventajas de estabilización.....	24
2.1.5.3. Métodos de estabilización.....	24
2.1.5.3.1. Estabilización de suelo con cal.	25
2.1.5.3.2. Ventajas de la estabilización con cal.....	26
2.1.5.3.3. Efectos de la adición de cal en un suelo.....	26
2.1.5.3.4. Materiales para la estabilización con cal.....	26
2.1.5.3.5. Acción de la cal sobre los suelos arcillosos.	27
2.2. RECICLADO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	28
2.2.1. GENERALIDADES	28
2.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.	28
2.2.2.1. Origen.	28
2.2.2.2. Composición.	29
2.2.2.3. Clasificación	29
2.2.3. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	29
2.2.3.1. Reutilización	29
2.2.3.2. Reciclaje.....	30
2.2.3.2.1. Residuos de Hormigón.....	30
2.2.4. Eliminación	31

2.3.	MANEJO DE ESCOMBROS EN EL PAÍS	31
2.3.1.	MANEJO DE ESCOMBROS EN LA CIUDAD DE CALI	32
3.	METODOLOGÍA.....	34
3.1.	MATERIALES.....	34
3.1.1.	Suelo fino para ser usado como sub-rasante.	34
3.1.2.	Geología general de la zona	35
3.1.3.	CONcreto reciclado.....	36
3.1.4.	Cal	37
3.2.	PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS	37
3.2.1.	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL	37
3.2.1.1.	Granulometría	37
3.2.1.2.	Hidrometría.....	38
3.2.1.3.	Límites de consistencia.....	38
3.2.1.4.	Compactación- Proctor modificado	39
3.2.1.5.	CBR del suelo	40
3.2.1.6.	Ensayo de compresión confinada	42
3.2.1.7.	Ensayo de permeabilidad con curva de Taylor.....	43
3.2.2.	CARACTERIZACION DEL CONCRETO RECICLADO.....	46
3.2.2.1.	Granulometría	46
3.2.2.2.	Gravedad específica y Absorción.	46
3.2.2.3.	Hidrometría.....	47
4.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	48
4.1.	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NATURAL.....	48
4.1.1.	Resultados del ensayo de granulometría	48
4.1.3.	Resultados del ensayo de límites de consistencia	50
4.1.4.	Clasificación del suelo	51
4.1.5.	Resultados de proctor estándar.....	51
4.1.6.	Resultados de C.B.R	52
4.1.7.	Resultados del ensayo de compresión simple	57
4.1.8.	Permeabilidad con consolidometro	58
4.2.	CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO RECICLADO	58
4.2.1.	Resultados del ensayo de granulometría al concreto	58
4.2.2.	Resultados de hidrometría.....	59
4.2.3.	Resultados de gravedad específica y porosidad	60
4.3.	ADICIÓN DE CAL Y CONCRETO RECICLADO.....	61
4.3.1.	LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	61
4.3.2.	DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMAS.	63
4.3.3.	RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN SIMPLE	65
4.3.4.	PERMEABILIDAD CON CONSOLIDOMETRO	69
5.	CONCLUSIONES.....	73
6.	BIBLIOGRAFIA.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de los suelos	19
Figura 2. Límites de Atterberg.....	23
Figura 3. Carta de plasticidad.....	24
Figura 4. Residuos de Construcción y demolición.	28
Figura 5. Porcentajes de fuente de residuos de construcción y demolición en Cali. ..	33
Figura 6. Esquema general del proceso de residuos de construcción en Cali.....	33
Figura 7. Localización de la zona de extracción del suelo.....	34
Figura 8. Suelo en el sitio de extracción	35
Figura 9. Distribución de estratos superficiales de materiales finos (Arcillas y Limos)	36
Figura 10. Concreto reciclado	36
Figura 11. Cal hidratada para estabilizar suelos.....	37
Figura 12 Lavado del suelo a través del tamiz No 200.	37
Figura 13 Toma lecturas con el Hidrómetro	38
Figura 14 Cazuela de Casagrande y suelo para determinar Limite Liquido.	39
Figura 15. Rollos para determinar Limite Platico	39
Figura 16 Tamizado a través de malla No 4	40
Figura 17. Proceso de compactación de moldes para ensayo de proctor.	40
Figura 18 Trituración y tamizado del suelo	41
Figura 19 Compactación de moldes para CBR	41
Figura 20 Inmersión de moldes compactados y toma de lectura inicial.	42
Figura 21 Penetración de los moldes en la prensa CBR	42
Figura 22 Fondo, cilindro tubular y cilindro sólido para remodelar la muestra	43
Figura 23 Comprensión de Probetas	43
Figura 24 Muestra de suelo en el Consolidometro.	44
Figura 25 Lavado y tamizado del concreto reciclado.	46
Figura 26 Pistón metálico y recipiente cónico.	46
Figura 27 Extracción del aire de muestra de concreto reciclado	47
Figura 28 Curva granulométrica del suelo-Tamizado.....	48
Figura 29 Curva Granulométrica del suelo-Hidrómetro	49
Figura 30 Curva Granulométrica del suelo natural	49
Figura 31 Determinación de límite Líquido.....	50
Figura 32 Carta de plasticidad-Clasificación del Suelo	51
Figura 33 Curva de compactación.....	51
Figura 34 Curvas a diferentes energías de compactación.	52
Figura 35 Curvas Expansión	53
Figura 36 Grafica Esfuerzo-Penetración para moldes compactados a 56, 26 y 12 Golpes.	54
Figura 37 Determinación del CBR para un rango de humedades y masa unitaria seca mínima	56
Figura 38 Curva de esfuerzo deformación	57
Figura 39 Curva Granulométrica concreto reciclado-Tamizado.....	58
Figura 40 Curva Granulométrica concreto reciclado-Hidrómetro.	59

Figura 41 Curva Granulométrica-Concreto reciclado.....	60
Figura 42 Curvas de fluidez para las dosificaciones	62
Figura 43 Variación de los límites de consistencia de acuerdo al porcentaje de concreto reciclado adicionado.....	63
Figura 44 Curvas de compactación del suelo con diferentes porcentajes de Concreto Reciclado.....	63
Figura 45 Variación de la densidad seca máxima de acuerdo con el porcentaje de concreto adicionado.	64
Figura 46 Variación de la Humedad optima de acuerdo con el porcentaje de concreto adicionado	65
Figura 47 Curvas Esfuerzo vs Deformación Unitaria de cada dosificación	67
Figura 48 Módulo de elasticidad de cada dosificación	68
Figura 49 Curvas de consolidación de Taylor para el cálculo del t_{90}	70
Figura 50 Variación de la permeabilidad y la relación de vacíos	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas del Agregado Grueso.....	18
Tabla 2. Características de los suelos transportados (Montejo, 2008).....	20
Tabla 4. Sistema unificado de clasificación –SUCS Fuente: Cuadro de resumen conforme a norma ASTM D-2487	22
Tabla 5. Clasificación de los RCD de acuerdo con el tipo de actividad.	30
Tabla 6. Recolección y aprovechamiento de residuos de construcción	32
Tabla 7 Características químicas de la Cal Utilizada.....	37
Tabla 8 Valores típicos de permeabilidad.....	45
Tabla 9 Datos para calcular el límite plástico del suelo natural.....	50
Tabla 10 Lecturas de Expansión del suelo.....	53
Tabla 11 Esfuerzos corregidos a 0,1 y 0,2 Pulgadas de penetración.	55
Tabla 12 Porcentajes de CBR.	55
Tabla 13 Valores de pesos específicos y porcentajes de CBR.....	56
Tabla 14 Datos iniciales para calcular la gravedad específica y la porosidad	60
Tabla 15 Gravedad específica y Porosidad	61
Tabla 16 Resultados del ensayo de límite líquido para las diferentes dosificaciones.	62
Tabla 17 Resultados de compactación en las diferentes dosificaciones	64
Tabla 18 Características de las probetas remoldeadas	66
Tabla 19 Resultados del ensayo de compresión Inconfinada.....	67
Tabla 20 Resultados de los módulos de elasticidad.....	68
Tabla 21 Resultados del ensayo de Permeabilidad con Consolidometro.....	70
Tabla 22 Resultados de principales de los ensayos realizados.	72

INTRODUCCIÓN

La infraestructura y el sistema vial de un país ayudan en gran medida a su desarrollo económico y social, lo cual lleva a realizar grandes inversiones en el mejoramiento y ampliación de la red vial nacional, buscando la optimización en la utilización de recursos naturales y facilitando el intercambio comercial mediante vías modernas y ágiles que permitan desplazar mercancías con mayor rapidez.

En la construcción y desarrollo de proyectos viales, a lo largo del trayecto con frecuencia se presentan suelos que no son aptos para los requerimientos estructurales del pavimento. Una de las soluciones que se pueden implementar para la utilización de este material es adicionar algún material estabilizante como cemento y/o cal o materiales no convencionales con el fin de aumentar su resistencia mecánica y disminuir su plasticidad. Obteniendo una doble contraprestación, una referida a lo económico y al impacto ambiental que se genera al disponer de material que no se podía utilizar; por otro lado al utilizar este suelo estabilizado genera menos demanda de material para base y subbase proveniente de canteras y ríos.

Materiales reciclados provenientes de demoliciones de estructuras, tales como: edificios, casas, cimentaciones, entre otras, han sido objeto de estudio en diversos países en todo el mundo para poderlos utilizar en nuevas estructuras civiles, en Colombia existen investigaciones sobre la utilización de materiales reciclados y materiales no convencionales en nuevos procesos constructivos de infraestructura.

Por lo anterior en este proyecto, se evalúa el comportamiento de un suelo fino al que se le adiciona diferentes porcentajes de cal y concreto reciclado y mediante ensayos de laboratorio se determina cual es la influencia de estos materiales sobre algunas de sus propiedades geotécnicas.

1. EL PROBLEMA.

1.1.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La construcción de infraestructura vial y de edificaciones se ha consolidado como uno de los sectores con mayor dinamismo en la economía Colombiana, sin embargo, es a su vez, uno de los factores que más influyen en los impactos al medio ambiente. Uno de los aspectos de mayor preocupación es la generación de residuos en las etapas de construcción, demolición, rehabilitación y remodelación, conocidos como Residuos de Construcción y Demolición – RCD. Factores como el mejoramiento de la calidad de vida, el avance progresivo en las construcciones y los avances tecnológicos han generado un incremento no controlado de su volumen principalmente en las zonas urbanas. Según el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente, la personería Municipal de Cali y otras entidades, en la capital el valle del cauca se generan diariamente 2480 mts³ de escombros de los cuales el 76.6% son provenientes del sector de la construcción y el 23.4% provienen de modificaciones particulares de vivienda, estos son depositados de manera no controlada en un sin número de vertederos autorizados y no autorizados (Sánchez, Ruiz, et al, 2013). El problema ambiental que plantean los RCD, se deriva no solo del creciente volumen de su generación, sino de su tratamiento, que todavía hoy es insatisfactorio en la mayor parte de los casos, en el país aún no existe la cultura de reciclaje y el manejo de estos residuos se reduce a la recolección, transporte y disposición.

Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos. Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, se puede tratar este tipo de suelos con ciertos materiales logrando una transformación física y/o química que mejoren sus capacidades mecánicas de soporte, lo que se conoce como estabilización de suelos. Si se consigue que bajo ciertas condiciones RCD, tengan un proceso para que hagan parte de una nueva estructura civil, en este caso mejorar las propiedades de resistencia del suelo, se estaría contribuyendo a la disminución del material que a diario llega a los rellenos sanitarios, aumentando la vida útil de estos y disminuyendo el impacto ambiental. Por estas razones se plantea la posibilidad de evaluar una mezcla de suelos finos, con ciertos porcentajes de concreto reciclado y cal con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, caracterizándolo y verificando que cumpla con las especificaciones con respecto a las normas INV E.

1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo es el comportamiento mecánico de un suelo fino al adicionarle cal y porcentajes de concreto reciclado triturado?

1.3.OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia mecánica de un suelo fino estabilizado con diferentes porcentajes de adición de concreto reciclado y cal.

1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una búsqueda bibliográfica de la estabilización de suelos con cal y concreto reciclado.
- Evaluar diferentes dosificaciones concreto reciclado, 3% de cal y suelo fino
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento mecánico de cada dosificación.
- Establecer comparaciones del comportamiento mecánico del suelo natural y con cada mezcla.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Mientras que en los países industrializados el reciclaje y reutilización de residuos de construcción y de demolición (RCD) forma parte de los planes estratégicos para su manejo integral y sostenible, en los países como Colombia se les considera en gran parte como basuras. La tendencia del sector de la construcción es apuntarle a métodos, materiales y sistemas constructivos que disminuyan el impacto adverso al medio ambiente. Una forma es incorporando materiales no convencionales a los métodos constructivos, con los cuales se obtenga los mismos o mejores resultados que los materiales convencionales tradicionalmente usados. El reciclaje y reutilización de material que proviene de una construcción o demolición (concreto, ladrillo, cerámica, vidrio) resulta ser una solución práctica y viable desde el punto de vista ambiental, ya que de esta forma no solo se ahorraría espacio en las escombreras, sitio donde estos materiales van a parar, sino que también se reduciría la demanda y extracción de materias primas naturales, convirtiéndose en una solución eco-sostenible.

Por esto la necesidad de impulsar la utilización de materiales de construcción no convencionales en los procesos constructivos. Pensando en el beneficio ambiental que pueda tener este material reciclado se podría reducir el costo considerablemente, lo cual depende también de la cantidad de concreto reciclado que se utilice, en este caso para la estabilización de suelos finos, requiriendo solamente las herramientas adecuadas para transformarlo y dejarlo apto como material estabilizante.

Con esta investigación se espera conseguir que las industrias de la construcción, especialmente construcciones de pavimentos, se interesen por el reciclaje de sus residuos lo cual de paso les puede representar beneficios económicos, ya que solo se tendría que transformar y reutilizar estos residuos.

1.6.ANTECEDENTES DEL USO DEL CONCRETO RECICLADO

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado, y puede utilizarse en muchas obras y estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para los materiales agregados tradicionales. Incluso se ha combinado con otros productos para estudiar su comportamiento y propiedades mecánicas. Los escombros de construcción y demolición son una problemática que se ha venido arraigando a lo largo del mundo por lo que en diferentes países se han venido implementando medidas de caracterización y control de los mismos con el fin de darle solución a esta problemática. La revisión de la literatura, mostró que las principales aplicaciones de este material se encuentran en la construcción de bases para pavimentos y manufactura de elementos prefabricados como bloques y pisos. Ejemplos recientes, se exponen a continuación:

- Foster Stephen W. (1986). El concreto reciclado como agregado. Concrete internacional

Determino las propiedades del concreto reciclado, tales como la absorción, gravedad especifica entre otras, con el fin de determinar la viabilidad de utilizarlo como material agregado.

- Jiménez Luis y Hernández Moisés (2007). Reparación de pavimento flexibles reciclados de construcción y demolición [Artículo]. Congreso Internacional de Reciclaje Metanica- La Habana-Cuba 10 al 12 de octubre de 2007.

En este artículo se caracteriza y clasifica de acuerdo con la norma española PG-3 una mezcla de áridos reciclados procedentes de la demolición de una cimentación con el fin de evaluar la posibilidad del reciclaje y reutilización de los RCDs en un relleno tipo terraplén. Se ha abordado la caracterización de una mezcla al 50% en peso de áridos reciclados de tamaño 0-10 mm y 10-40 mm procedentes de la demolición de una cimentación. Los ensayos de laboratorio realizados han permitido determinar algunas de sus propiedades geotécnicas y su clasificación como material para utilizar en rellenos tipo terraplén de acuerdo con el artículo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. El material se clasifica como Suelo Tolerable, siendo admitido su uso en la formación de núcleos de terraplenes de más de 5 m de altura sin necesidad de tomar ninguna precaución especial en la ejecución de la coronación o espaldones.

- BARBUDO MUÑOZ, María Auxiliadora. (2012). Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias. Tesis doctoral. Córdoba-España: Universidad de Córdoba. Departamento de ingeniería rural. 119 P.

En esta tesis se han caracterizado diferentes áridos reciclados, de diferente naturaleza y origen, con la intención de obtener correlaciones entre su composición y su

comportamiento mecánico en obra. Para ello, la investigación se centra en: Caracterizar las principales propiedades físico-químicas de diferentes tipos de áridos reciclados procedentes de diferentes plantas de tratamiento. Estimar el comportamiento mecánico de los áridos reciclados a partir de sus componentes por medio de un análisis estadístico. Se persigue encontrar una ecuación matemática a través de la cual poder estimar el comportamiento mecánico de los áridos reciclados, a partir de los resultados obtenidos en el ensayo composición. Estudiar la viabilidad de uso de áridos reciclados con partículas cerámicas como suelo-cemento, en su uso como capa estructural en carreteras. Estudiar las consecuencias medioambientales del empleo de áridos reciclados en carreteras.

- Vásquez Montoya, Julián Humberto. (2007). Resistencia mecánica de un suelo fino-granular con diferentes porcentajes de adición de cal y cemento evaluado en diferentes tiempos de curado. Universidad de Medellín.

En esta investigación se estudia el comportamiento de un suelo fino granular adicionado con cal y cemento bajo la sollicitación de ensayos de compresión simple y tracción indirecta, evaluando diferentes tipos de curado, el resultado encontrado es que el suelo curado con cal mejora sus capacidades tanto a tracción como compresión cuando se le adiciona pequeñas cantidades de cemento.

- Sobhan, Khaled (1999) "Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 11, núm. 2, pp. 124-130.

Una investigación experimental en Estados Unidos, emprendida por Sobhan y Krizek (1999) consistió en probar la resistencia a la fatiga de un material utilizado para base de pavimento, compuesto por agregados reciclados, pequeñas cantidades de cemento Portland y cenizas volantes, reforzado con fibra de acero. Las muestras preparadas alcanzaron límites de resistencia comparables con los materiales típicos utilizados en pavimentos para autopistas.

- Nataatmadja, A. (2001) "Resilient response of recycled concrete road aggregates" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 127, núm. 5, pp. 450-453.

En este mismo campo de la construcción, Nataatmadja y Tan (2001), de la Universidad Griffith en Australia, presentaron resultados de su trabajo con agregados reciclados de concreto (RCA) obtenidos por trituración. Los especímenes fueron sometidos a la prueba triaxial con repetición de carga un día después de su compactación. Se determinó que la resistencia puede verse afectada significativamente debido al contenido de finos (10%) en las muestras por lo que su utilización en bases y sub bases de carreteras queda sujeta a un control efectivo de estándares de calidad del producto.

- Chini, Abdol et al (2001) “Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track” Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 127, núm. 6, pp. 486-492.

Por su parte, Chini et al (2001) reportan desde la Universidad de Florida, una evaluación de materiales reciclados de concreto para base de pavimento con mezclas asfálticas en caliente y como agregado de cemento Portland en pavimentos rígidos. Comprobaron que en la medida que aumenta el porcentaje de RCA en las muestras disminuye la resistencia a esfuerzos de flexión y compresión. Sin embargo los valores alcanzados, del orden de 35 Mpa, se consideran aceptables. Similares resultados se hallaron en Corea, presentados por Park (2003) al experimentar con material reciclado seco y húmedo para bases de pavimento rígido, y en Tokio, por Agil et al (2005) quienes estudiaron las características de esfuerzo deformación de los agregados reciclados de concreto sometidos a compresión triaxial.

1. Pérez, I., et al (2007) “Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición” Materiales de Construcción. CSIC. Instituto Eduardo Torroja. Vol. 57, núm. 285, pp. 17-29.

Otras aplicaciones interesantes se encuentran en la construcción de pavimentos flexibles a base de emulsiones como la reportada en España por Pérez et al (2007). Su trabajo consistió en la dosificación de mezclas bituminosas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Encontraron que las propiedades mecánicas son parecidas a las de aquellas mezclas fabricadas con materiales naturales de cantera. Sin embargo, experimentaron una disminución de la resistencia por pérdida de cohesión debida a la acción del agua, atribuida a una mala selección de los materiales.

Dichos resultados contrastan con los hallados en Quintana Roo, México, por Jiménez y Hernández (2007) en un trabajo casi paralelo al anterior, que tuvo como finalidad comprobar que es posible la elaboración de una mezcla asfáltica con material producto de los residuos de construcción y demolición, susceptible de ser empleada en la reparación o bacheo de pavimentos flexibles. El estudio consistió básicamente en recolectar residuos reciclables en diferentes obras seleccionadas, consiguiendo agregados pétreos por trituración que sirvieron para preparar una mezcla con emulsión asfáltica, la cual fue sometida a distintas pruebas de campo y laboratorio para determinar su comportamiento mecánico. Los resultados obtenidos se encontraron dentro de los rangos aceptados por la normatividad oficial. El estudio incluyó un análisis de costo directo por metro cúbico de muestra reciclada que reveló un ahorro del 22% en relación a una mezcla tradicional.

El estudio del comportamiento del concreto fabricado con materiales pétreos reciclados, en México, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Martínez y Mendoza, 2006), se ha enfocado al uso de residuos de concreto premezclado, teniendo cierto avance en cuanto a sus propiedades mecánicas, dejando

ver que con una granulometría adecuada su comportamiento resulta similar al de un concreto natural clase dos, según el Reglamento de Construcción del Distrito Federal. Sin embargo, el uso generalizado de concreto premezclado aún tiene muchas limitaciones, sin olvidar que la mayor cantidad de residuos proviene de los procesos de construcción y demolición de edificios.

Una investigación experimental en Estados Unidos, emprendida por Sobhan y Krizek (1999) consistió en probar la resistencia a la fatiga de un material utilizado para base de pavimento, compuesto por agregados reciclados, pequeñas cantidades de cemento Portland y cenizas volantes, reforzado con fibra de acero. Las muestras preparadas alcanzaron límites de resistencia comparables con los materiales típicos utilizados en pavimentos para autopistas. En este mismo campo de la construcción, Nataatmadja y Tan (2001), de la Universidad Griffith en Australia, presentaron resultados de su trabajo con agregados reciclados de concreto (RCA) obtenidos por trituración. Los especímenes fueron sometidos a la prueba triaxial con repetición de carga un día después de su compactación. Se determinó que la resistencia puede verse afectada significativamente debido al contenido de finos (10%) en las muestras por lo que su utilización en bases y sub bases de carreteras queda sujeta a un control efectivo de estándares de calidad del producto. Por su parte, Chini et al (2001) reportan desde la Universidad de Florida, una evaluación de materiales reciclados de concreto para base de pavimento con mezclas asfálticas en caliente y como agregado de cemento Portland en pavimentos rígidos. Comprobaron que en la medida que aumenta el porcentaje de RCA en las muestras disminuye la resistencia a esfuerzos de flexión y compresión. Sin embargo los valores alcanzados, del orden de 35 Mpa, se consideran aceptables. Similares resultados se hallaron en Corea, presentados por Park (2003) al experimentar con material reciclado seco y húmedo para bases de pavimento rígido, y en Tokio, por Agil et al (2005) quienes estudiaron las características de esfuerzo deformación de los agregados reciclados de concreto sometidos a compresión triaxial.

Otras aplicaciones se han enfocado hacia la obtención de material pétreo producto de los procesos mismos de construcción y demolición para la producción de concreto. En este sentido, Khalaf y De Venny (2004) en el Reino Unido, se enfocaron a demostrar que el material reciclado de escombros de albañilería, especialmente de la demolición de muros, puede ser utilizado como agregado en la fabricación de concreto. Otros autores han efectuado investigaciones que revelan poca diferencia entre las características físicas del agregado grueso natural y el obtenido con materiales reciclados.

En España, Huete y Blandón (2004) se avocaron a la caracterización de material reciclado de residuos cerámicos de construcción, determinando que el material granular obtenido es apto para distintas aplicaciones en la industria de la construcción como sub-bases de carreteras, firmes de grava-cemento y áridos para empedrados y engravillados.

Por su parte, Domínguez et al (2004) compararon las características físicas del agregado grueso natural en la región de Quintana Roo, México con agregado

obtenido por trituración de residuos de construcciones de concreto. Los resultados mostraron poca diferencia entre ambos, tal y como se observa en la tabla 1.

		Material	
Característica	Unidad	Natural	Reciclado
Peso volumétrico seco y suelto	Kg./m ³	1138	1176
Densidad	Kg./lt	2,03	11,82
Absorción	%	13,64	43,4
Abrasión	%	35,7	

Tabla 1. Características físicas del Agregado Grueso

En Hong Kong; según la investigación realizada por Ponn (2005) para el año de 1995 este país generó entre 15 y 20 millones de toneladas de residuos. Con esto el gobierno estableció la construcción de una planta piloto con el fin de procesar los residuos sólidos de concreto y convertirlos en agregados para la construcción, en ella se realizaban procedimientos de vibración, trituración y almacenamiento de los residuos. La planta empezó a generar aproximadamente 524.000 toneladas de agregados reciclados. Que fueron utilizados en diferentes aplicaciones como ejemplo entorno para tuberías (10.73%), material de relleno granular (52,43%), sub-bases para vías (5.66%), concretos (10.73%) y en otras aplicaciones 29.92%.

En Israel a pesar de que la producción de residuos de construcción y demolición es menor. Según Katz, Baum & Nissim (2005) en este país se producen alrededor de 7,5 millones de toneladas anuales de escombros, de los cuales solo una pequeña cantidad se trituran y se tamizan para servir como un material útil en la infraestructura mientras que la gran mayoría son colocados en los vertederos legales e ilegales a lo largo del país. Como la cantidad de escombros ha aumentado en los últimos años en el 2003 el gobierno implementó un plan nacional para hacer frente a los residuos de construcción, basado en 4 principios como medida para que este plan nacional causara efecto, el gobierno estipula que de cada m² de concreto debe contener al menos el 0.2% de volumen (m³) de agregados reciclados con el fin de ir aceptando este material como parte de las obras públicas y privadas.

Según lo reportado por (Janssen & Put, 2005) en Holanda se generaron aproximadamente 20 millones de toneladas de residuos de la construcción y la demolición anualmente, y de este total, el 95% del mismo es reutilizado. Con aceptación de materiales contaminados con residuos peligrosos, el resto de materiales se reutiliza de manera eficiente en sub-bases de carretera un 88.1%, en el concreto un (3,3%) y (8.6 %) en otras aplicaciones.

Existe una relación con respecto a la naturaleza de los escombros generados en Colombia con la situación en España; según Vázquez (2005), 38.5 millones de

toneladas para el 2003, además de esto en España se consumen aproximadamente 451 millones de toneladas de agregado donde aproximadamente el 65% de esa cantidad se utilizó para producción de elementos de concreto, mortero, asfalto y prefabricados de concreto y el 35% se utilizó para la construcción de bases no consolidadas y sub-bases de carreteras, otorgándoles así una pertenecía al tema de la reutilización de los residuos de construcción de demolición.

2. MARCO TEÓRICO

2.1.EL SUELO

Se considera que suelo es un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación del agua. Los suelos provienen de la alteración de las rocas por la acción de los fenómenos atmosféricos durante cierto tiempo. El tiempo de alteración se denomina meteorización; se realiza por desintegración o descomposición de las rocas.

2.1.1. COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS.

Un suelo está constituido por tres partes, una parte sólida, otra líquida y otra gaseosa. La parte sólida está formada en su mayoría por minerales del suelo, la parte líquida está compuesta por el agua, aunque en el suelo puedan existir otros líquidos de menor significación, la parte gaseosa la comprende principalmente el aire, pero también pueden estar presentes otros gases (vapores sulfuros, anhídrido carbónico, etc.).

La figura 1 representa un esquema de una muestra de suelo, con sus partes principales:

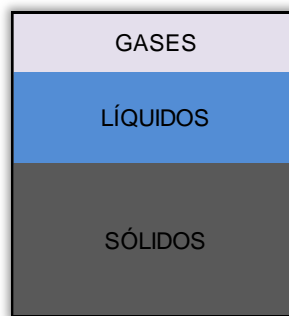


Figura 1. Composición de los suelos

2.1.1.1.SUELOS RESIDUALES

Son aquellos formados en el mismo sitio donde se encuentra actualmente ósea que prácticamente se hallan ubicados junto a la roca madre que los ha originado. Una característica importante es el llamado perfil de meteorización que es una secuencia de capas de materiales con diferentes propiedades que se encuentran encima o en lugar próximo a la roca que les dio origen. Varían de un lugar a otro dependiendo del

tipo, edad y estructura de la roca madres, la topografía, la vegetación, el drenaje, la actividad bacterial y el clima.

2.1.1.2.SUELOS TRASPORTADOS

Cuando agentes físicos han traslado sus partículas y depositado en el sitio donde se encuentran. Un caso especial lo constituyen los rellenos, que son depósitos de suelo hechos por el hombre. Estos suelos han sufrido un proceso de formación tal como los suelos residuales y luego han sido trasladados por diferentes agentes como el agua, el hielo, el viento, la gravedad y ciertos organismos. Dependiendo del tipo de agente las partículas en cuanto a su tamaño, forma y textura se clasifican como se muestra en la tabla 2.

Características	Agente			
	Agua	Aire	Hielo	Gravedad
Tamaño	Disminución por solución, poca abrasión en carga suspendida, alguna abrasión e impacto en carga arrastrada.	Considerable reducción.	Considerable molienda e impacto.	Considerable impacto
Forma	Redondeo de arena y gravas.	Alto grado de redondeo.	Angular pulimiento de caras.	Angular no esférico.
Textura	Arena lisa pulida brillante.	Superficies deslustradas por impacto.	Superficies estriadas.	Superficiales estriadas.

Tabla 2. Características de los suelos transportados (Montejo, 2008)

2.1.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Dentro de los aspectos ingenieriles las propiedades de los suelos de mayor interés son: Estabilidad volumétrica, Permeabilidad, Comprensibilidad, Durabilidad, Resistencia. (Montejo, 2008).

2.1.2.1.Resistencia de los suelos

Con algunas excepciones, es en general más baja cuando mayor sea su contenido de humedad.

Los suelos arcillosos al secarse, alcanzan resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos. Existen casos en donde la disminución de la humedad puede significar reducción de resistencia, pues se han presentado casos de deslizamientos de tierra provocados por arcillas que se secaron y agrietaron provocando con ello que el comportamiento del material sea el de un suelo friccionante que pueda tener menor resistencia que si se considera como cohesivo a humedades mayores. La acción abrasiva del tránsito, por ejemplo, puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión.

Por otro lado, dependiendo de la humedad y energía de compactación se pueden lograr diferentes características de resistencia de un suelo arcilloso, ya que un suelo de estos compactado del lado seco en la curva de compactación presenta, con la humedad de compactación, un comportamiento relativamente elástico y con una resistencia relativamente alta; mientras que este mismo suelos compactado con una alta humedad , no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso: este efecto se debe, en general, a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas, propiciando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación bajas.

De otra parte, se ha visto que en suelos finos, tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, sobre todo cuando se emplean humedades más altas que las óptimas, debido a que la energía aplicada por impactos puede ocasionar que un suelo compactado del lado húmedo presente resistencias del orden de hasta un cuarto de veces menor que la resistencia, que, a igualdad de circunstancias, presenta el mismo suelo compactado en forma estática. La aplicación a lo anterior reside en la diferente estructuración que adoptan las arcillas al ser compactadas mediante procedimientos de compactación diferentes. (Montejo, 2008).

2.1.2.2. Definición de suelos plásticos.

Existen suelos que al cambiar su contenido de agua, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado plasticidad. Estos suelos han sido llamados arcillas. La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido para clasificar suelos en forma puramente descriptiva.

2.1.3. CLASIFICACION DE LOS SUELOS

Teniendo en cuenta que en la naturaleza existe una gran variedad de suelos la ingeniería de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado.

En la actualidad los sistemas más utilizados para la clasificación de los suelos, en estudios para estudios para diseño de pavimentos de carreteras y aeropistas son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification.

2.1.3.1. Sistema de clasificación de suelos SUCS (ASTM D-2487).

Este sistema de clasificación de suelos al igual que la clasificación AASHTO M-145 describe los suelos para propósitos ingenieriles en base a la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, generando así dos grandes grupos de suelos que a continuación se presenta. Suelo de grano fino, si el 50% o más del peso seco de la muestra pasa por el tamiz No 200 (75 - μ m). Suelo de grano grueso, si más del 50% del peso seco de la muestra se retiene en el tamiz N ° 200 (75 μ m).

Aparte del tamaño de las partículas otro parámetro que sirve para generar la clasificación SUCS en un suelo de grano fino es el límite líquido que presente el suelo analizado.

DIVISIONES PRINCIPALES			SÍMBOLO DEL GRUPO	CRITERIOS
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS MÁS DEL 50% ES RETENIDO EN LA MALLA 200	GRAVAS 50% O MÁS DE LA FRACCIÓN GRUESA SE RETIENE EN LA MALLA NO 4	GRAVAS LIMPIAS	GW	Gravas bien graduadas mezclas de gravas y arena con pocos o nada de finos
			GP	Gravas mal graduadas mezclas de grava y arena con poco o nada de fino
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas de la grava arena y limo
			GC	Gravas arcillosas mezclas de gravas, arena y arcilla.
	ARENAS MÁS DEL 50% DE LA FRACCIÓN GRUESA PASA LA MALLA NO 4	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas con poco o nada de finos
			SP	Arenas más graduadas, arenas con grava con poco o nada de finos
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezcla de arena y arcilla
			SC	Arenas arcillosas mezclas de arena y arcilla
SUELOS DE GRANO FINO 50% O MÁS PASA LA MALLA 200	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO $LL < 50\%$		CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
			ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.
			OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO $LL \geq 50\%$		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.
			MH	Limos inorgánicos, limos micáceos y diatomáceos, limos elásticos.
			OH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad
			CL-ML	
	Suelos con elevada proporción de materia orgánica		Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Tabla 3. Sistema unificado de clasificación –SUCS

Fuente: Cuadro de resumen conforme a norma ASTM D-2487

2.1.4. CONSISTENCIA DEL SUELO

Cuando existen minerales de arcilla en un suelo de grano fino, éste puede ser remodelado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva es debida al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido, como muestra la figura 2.

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen también como límites de Atterberg.

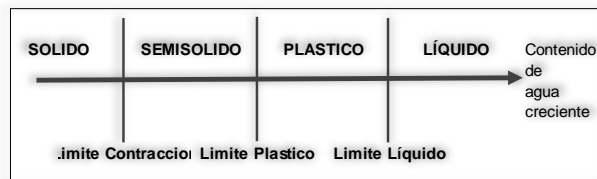


Figura 2. Límites de Atterberg

- **Límite líquido (LL):** es determinado por medio de la copa de Casagrande y se define con el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de 1/2 (12.7 mm) mediante 25 golpes.
- **Límite plástico (LP):** se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 1/8 in (3.18mm) de diámetro.

La diferencia entre el límite líquido y el plástico se un suelo se define como índice de plasticidad (IP).

2.1.4.1. Índice de plasticidad (IP).

El Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ecuación 1}$$

2.1.4.2. Carta de plasticidad

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos.

La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación $PI = 0.73 (LL - 20)$. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. (Braja M, 2001).

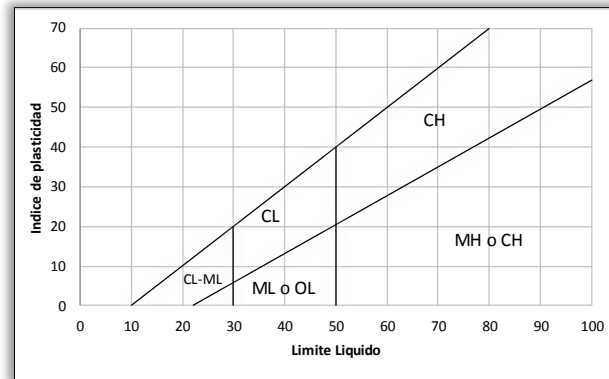


Figura 3. Carta de plasticidad

2.1.5. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.

2.1.5.1. Definición de estabilización

La estabilización de un suelo es el proceso mediante el cual se busca mejorar sus características físicas, adicionando una cantidad de un agente estabilizador, el cual depende del tipo de suelo a tratar y las características que se desean mejorar, buscando economía y el cumplimiento de los requerimientos exigidos por las especificaciones técnicas de cada proyecto en cual se desee hacer uso de esta alternativa. (Vasquez & Rivera, 2007).

2.1.5.2. Ventajas de estabilización

Las ventajas directas que obtenemos de la estabilización son, entre otras, las siguientes: aprovechar suelos de baja calidad, evitando su extracción y transporte a vertedero; reducir la sensibilidad al agua de los suelo, aumentando su resistencia a la erosión y agentes climáticos, obtener una plataforma estable para las infraestructuras. (Montejo, 2008).

2.1.5.3. Métodos de estabilización.

Las propiedades del suelo se pueden alterar por cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos, de los que la electroósmosis y la utilización de pilotes electro-metálicos son probablemente los mejor conocidos.

- Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de algunos agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

Teniendo en cuenta la variabilidad de los suelos y la composición de los mismos, es de esperarse que cada método resulte solo aplicable a un número limitado de ellos. (Montejo, 2008).

2.1.5.3.1. Estabilización de suelo con cal.

El uso de la cal en la estabilización de suelos sigue el propósito de mejorar las características naturales del suelo de modo que aumente su capacidad para resistir los efectos inducidos por las cargas. La cal se adapta perfectamente en la mayoría de los casos para lograr positivos resultados y su empleo suele ser conveniente por tratarse de un producto de costo moderado, de fácil

Es más práctico utilizar cal cuando el índice de plasticidad del suelo es mayor de 15 y el porcentaje de tamiz No. 200 es de 25. Sin embargo, la cal es poco efectiva en suelos altamente orgánicos o con pocas cantidades de arcilla capaz de reaccionar con la cal. Si el material a estabilizar tiene un índice de plasticidad menor a 15 y ensayos de resistencias de laboratorio han demostrado que valores de resistencia al corte no cumplen con las especificaciones de diseño, se puede en este caso usar una combinación de cal y cemento. La cal debe adicionarse primero con el fin de reducir la plasticidad del suelo y al final del mezclado adicionar el cemento. El proceso de mezcla y compactación usando cualquiera de estos dos métodos debe hacerse en un tiempo limitado de dos horas. (Montejo, 2008)

La cal sola o combinada con otros materiales puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general los suelos arcillosos el grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz No 200 y un índice de plasticidad mayor a 10) se considera buenos candidatos a estabilizar.

Subrasante: La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante o subbase, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.

Bases: La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con las características mínimas para funcionar como una base (como la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que contienen al menos el 50 por ciento de material grueso retenido en la malla o tamiz No. (National Lime Association, 2004).

2.1.5.3.2. Ventajas de la estabilización con cal.

Las ventajas más importantes de la cal como aditivo estabilizante para el tratamiento de suelos, son las siguientes: produce los cambios deseados, su economía, pequeño porcentaje que se agrega al suelo, fácil manipulación para la mezcla, no tiene características tóxicas. (Montejo, 2008).

2.1.5.3.3. Efectos de la adición de cal en un suelo.

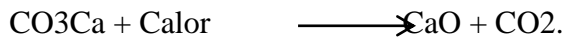
La cal cambia las características físicas de los suelos arcillosos en diversas maneras así:

- El IP de material decrece considerablemente debido en la mayoría de los casos al aumento en el LP y la disminución del LL.
- La cal y el agua aceleran el rompimiento de los grumos arcillosos tornándolos más trabajables (Genera, 1976)
- El coeficiente de retracción decrece notablemente.
- En la gran mayoría de los suelos la adición de cal produce disminución de la máxima densidad seca comparada con la obtenida con el suelo sin tratar.
- Debe tenerse muy en cuenta el aumento de resistencia al curar a temperaturas elevadas, en relación con el incremento menor o nulo en algunos casos de temperatura ambiente.
- Un aumento en la proporción suelo-cal incrementa resistencias hasta un punto crítico con porcentajes de cal aumenta.
- La pérdida de resistencia y densidad presentadas en las mezclas de suelo cemento debida a demoras o dilataciones entre el proceso de mezcla y compactación no ocurre en el proceso de mejoramiento de suelo-cal.
- Protege contra los cambios excesivos en el volumen del suelo, reduciendo el encogimiento lineal a la expansión
- Acelera la pulverización de los grumos de arcilla, haciendo los suelos más uniforme.
- Seca el suelo permitiendo la adición controlada para la compactación.
- Aumenta la resistencia a la compresión debido a la acción cementante.
- Aumenta la capacidad de soporte medida en el CBR
- Forma una barrera impermeable contra la humedad superficial y capilar.
- Forma una barrera susceptible de trabajo, transformando las arcillas inestables en una sub-rasante firme que se mantiene en las mismas condiciones aun en el tiempo de lluvia. Esto facilita la colocación de la sub-base y la capa estabilizada funcionara como parte de la estructura del pavimento.
- Aumenta la resistencia a la erosión. (Genera, 1976)

2.1.5.3.4. Materiales para la estabilización con cal.

CAL: Para el tratamiento de suelos se puede utilizar: cal viva, cal hidratada o una lechada de cal.

La cal viva: se produce de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza – CaCO_3) en óxido de calcio.



La cal hidratada: se obtiene cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. La cal hidratada (hidróxido de calcio) es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.



La lechada de cal: es la suspensión de la cal hidratada en agua. Su empleo en tratamiento de suelo permite por un lado, evitar el polvo producido durante el extendido de cal y por otro, controla mejor la humedad de los suelos secos.

El uso vial más importante de la cal es el de estabilizar suelos, para estos fines se emplea la cal hidratada en polvo, que viene envasada en bolsas de papel facilitando de esta manera su manipuleo y transporte.

SUELO: preferiblemente de tipo arcilloso; suelos gravosos con altos porcentajes de arcilla. En suelo con índice de plasticidad menor de 15, la cal aumenta límites plásticos y líquidos, causando un aumento en el índice de plasticidad. En cambio en suelos más plásticos se reducen el índice de plasticidad. Deben rechazarse suelos que contengan más del 3% de materia orgánica. (Olivares, 1967).

2.1.5.3.5. Acción de la cal sobre los suelos arcillosos.

La adicción de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor y menor grado, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y la resistencia a la compresión simple y el CBR.

- Debido a reacciones rápidas (minutos/horas); es una estabilización por modificación.
- Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); es una estabilización por cementación.

2.2.RECICLADO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2.2.1. GENERALIDADES

La construcción es uno de los sectores industriales esenciales para el desarrollo y progreso de las ciudades. Sin embargo, es uno de los que más influye en los impactos sobre el medio ambiente, uno de los temas que más preocupa es los grandes volúmenes de escombros que se generan por procedimientos propios de la construcción. (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010).



Figura 4. Residuos de Construcción y demolición.

La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) está íntimamente ligada a la actividad del sector de la construcción, esto surge como una consecuencia directa de la demolición de edificaciones y de infraestructura que debido al uso y al tiempo se han vuelto obsoletas, así como por la construcción de otras nuevas.

Se consideran residuos de construcción y demolición a residuos, básicamente inertes, constituidos por: tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, maderas y, en general, todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas.

2.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.

2.2.2.1.Origen.

Estos materiales provienen de la construcción y demolición de edificios e infraestructuras; rehabilitación y restauración de edificios y estructuras existentes; construcción de nuevos edificios y estructuras. El sector de la construcción y edificación puede dividirse de acuerdo al objeto de la construcción en:

Sector de la edificación - vivienda y edificios utilitarios - el cual incluye:

- El sector de la vivienda que se dedica a la construcción, mantenimiento y renovación de viviendas;
- El sector de edificación utilitaria que construye mantiene y renueva oficinas, edificios industriales y similares.

Sector de infraestructuras que incluye:

- Construcción de carreteras;
- Otras infraestructuras especiales (puentes, túneles, canales etc.)

2.2.2.2.Composición.

En general, se puede decir que el escombros está compuesto por un 20% de hormigón, un 50% de material de albañilería (cerámico, escayolas, etc.), un 10% de asfalto y un 20% de otros elementos como maderas. (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010).

2.2.2.3.Clasificación

En una aproximación genérica, se puede realizar una clasificación de los RCD de acuerdo al tipo de actividad y objeto de la obra que los genera. La tabla 5 muestra tal clasificación, incluyendo los principales componentes de los residuos en cada caso.

2.2.3. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

2.2.3.1.Reutilización

De entre las alternativas de tratamiento de los residuos que se generan en las obras de construcción, la opción más deseable es, sin duda, la reutilización de los productos obtenidos en nuevas construcciones.

La ventaja de esta opción es la de impedir la contaminación debido a que a través de este mecanismo desaparece el residuo, reconvirtiendo las tareas de demolición o desmontado de edificaciones existentes y la recogida de restos en las unidades de obra nuevas, formando parte de un nuevo proceso de producción con los materiales que van a ser reutilizados.

Las opciones de reutilización son las siguientes:

- Reutilización directa en la propia obra.
- Reutilización en otras obras.

La reutilización directa en la propia obra implicaría dos fases:

- Selección previa del material desmontado.

Limpieza previa del mismo.

ACTIVIDAD	OBJETO	COMPONENTES	OBSERVACIONES
Demolición	Viviendas. Otros edificios. Obras publicas	Antiguas: mampostería, ladrillo, madera, yeso, tejas Recientes: ladrillo, hormigón, hierro, acero, metales y plásticos. Industriales: hormigón, acero, ladrillo, mampostería. Servicios: Hormigón, ladrillo, mampostería, hierro, madera. Mampostería, hierro, acero, hormigón armado	Los materiales dependen de la edad del edificio y del uso concreto del mismo en el caso de los de servicios Los materiales dependen mucho de la edad y el tipo de infraestructura a demoler. No es una actividad frecuente.
Construcción	Excavación Edificación y obras publicas Reparación y mantenimiento Reconstrucción y rehabilitación.	Tierras Hormigón, hierro, acero, ladrillos, bloques, tejas, materiales cerámicos, plásticos, materiales no féreos. Suelo, roca, hormigón, productos bituminosos. Viviendas: cal, yeso, madera, tejas, materiales cerámicos, pavimentos, ladrillo. Otro: hormigón, acero, mampostería, ladrillo, yeso, cal, madera.	Normalmente se reutilizan en gran parte. Originados básicamente por recortes, materiales rechazados por su inadecuada calidad y roturas por deficiente manipulación. Generación de residuos poco significativa en el caso de edificación.

Tabla 4. Clasificación de los RCD de acuerdo con el tipo de actividad.

2.2.3.2. Reciclaje

Esta opción consiste en la reconversión de los residuos en nuevas materias primas que puedan ser utilizadas en la fabricación de nuevos productos para ser empleados en nuevas obras.

Con respecto a la reutilización, presenta diferencias, ya que los productos originales son alterados en su forma original y en sus propiedades, por tanto se trata de reutilizar después de transformar el residuo en otros productos. Las cantidades de RCD generadas, especialmente, en las últimas décadas, hacen necesario plantear una gestión tendente hacia el reciclaje, evitando el relleno y vertido directo.

Estos RCD podrían ser potencialmente reciclables. Residuos de: aluminio, cobre, latón o bronce, acero, hierro, plomo, asfalto, áridos y piedras naturales, mármoles, de cerámica, **hormigón**, yeso, madera, P.V.C., vidrio, caucho, fibras minerales, Zinc.

2.2.3.2.1. Residuos de Hormigón

Es el material predominante en las cimentaciones y estructuras. Se puede reciclar como árido para hormigón nuevo, pero para ello, necesita estar limpio de residuos de albañilería así como de maderas, metales y plásticos.

También se puede emplear en la modificación del paisaje en el que se forman zonas ajardinadas o en obras civiles disponiéndose como sub-bases de carreteras o relleno de terraplenes.

En función del tipo de obra y el uso posterior del residuo, el tratamiento de trituración será diferente. Por otra parte, el polvo producido en la extracción de piedras puede utilizarse como agregado y conseguir un aspecto pétreo en la fabricación de morteros.

También se podría reciclar en elementos de hormigón prefabricados, como vigas, pilares, viguetas, paneles, losas alveolares, tuberías o piezas de mobiliario urbano. En última instancia se podrían depositar junto a otros escombros inertes y llevarlos a un vertedero de tierras y escombros.

2.2.4. Eliminación

Como última alternativa al proceso final de los RCD, debe ser la eliminación en un vertedero. Esta es la opción que más impacto genera aún más cuando los materiales llegan a estos sitios sin ser clasificados. Se distinguen dos tipos de vertederos:

Los vertederos controlados que evitan los efectos contaminantes. Estos se realizan en depósitos habilitados al efecto, de modo que se garantice lo siguiente:

Impermeabilidad del suelo.

- Alejamiento de corrientes subterráneas de agua.
- Recogida y tratamiento de los lixiviados antes de ser vertidos a los cauces naturales.
- Enterramiento y cubrición regular de las basuras.
- Evacuación correcta del metano producido por la fermentación de las basuras, para evitar que se produzcan incendios o explosiones.

Los vertederos incontrolados: no evitan efectos contaminantes y ocasionan los siguientes problemas:

- No existe control de la cantidad ni de la calidad de los residuos vertidos.
- No se realizan separaciones de RCD por lo que se pierden materiales muy aprovechables.
- Se produce un amontonamiento de residuos que llega a ser muy voluminoso y sirve de refugio para roedores y otro tipo de animales.
- Se emiten olores desagradables y humos debido a que se prende fuego a los residuos para recuperar los metales.
- Degradación del paisaje.

2.3.MANEJO DE ESCOMBROS EN EL PAÍS

En Colombia, el manejo de escombros lo hacen pocas ciudades, a diferencia de otros países en donde se practican diversas formas para el manejo adecuado de estos residuos. Es necesario formular propuestas para mejorar y optimizar el proceso. El

manejo de los residuos en mención, es una actividad de gran importancia medioambiental y significativa por sus potenciales impactos y efectos. En Colombia, algunas ciudades se han pronunciado sobre el tema, demostrando así que está surgiendo la conciencia necesaria para lograr un adecuado manejo de escombros. En algunas ciudades de Colombia, las autoridades ambientales han determinado unos sitios de acopio para estos escombros, puesto que desde la localización y replanteo hasta la entrega de la obra, se presenta una heterogeneidad en la composición de estos residuos.

La legislación ambiental colombiana tiene disposiciones y regulaciones relacionadas con la gestión ambiental de los residuos, de escombros y de materiales sobrantes de la construcción de obras civiles. Es responsabilidad del Gobierno y de la autoridad ambiental, exigir que los constructores cumplan los requisitos mínimos que las leyes colombianas han establecido. (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010).

Recolección y aprovechamiento de residuos de construcción.

CIUDAD	RECOLECCIÓN (T/AÑO)	APROVECHAMIENTO (%)
MEDELLÍN	667.300	30%
CALI	396.000	45%
IBAGUÉ	89.000	17%

Tabla 5. Recolección y aprovechamiento de residuos de construcción

Fuente: (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010)

2.3.1. MANEJO DE ESCOMBROS EN LA CIUDAD DE CALI

El Decreto Municipal 291 de 2005, que regula la gestión integral de escombros en Cali, contiene las herramientas necesarias para que el Municipio con sus dependencias, adelante un buen manejo y regulación de estos desechos en la Ciudad. Así lo confirma, un estudio jurídico que indica que el Dagma, de conformidad con el Acuerdo 01 de 1996, es la autoridad ambiental en la materia. Además, el Decreto Nacional 1713 de 2004, en su artículo 44, determina que la coordinación del manejo de escombros le corresponde al Municipio con la entidad prestadora del servicio público de aseo, en este caso, la Empresa de servicio público de aseo de Cali. Cabe destacar la Resolución 541 de 1994, del Ministerio del Medio Ambiente, que establece que los Municipios deben seleccionar los sitios específicos para la disposición de los materiales y elementos señalados como escombros. La normatividad exige condiciones específicas en los vehículos automotores o de tracción animal que se utilicen para recolectar y transportar escombros. (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010). En la ciudad de Cali hoy no existe un sitio de disposición final de escombros. A esto se le suma que muchos carretilleros y empresa llevan los desechos de forma ilegal a sitios no autorizados, como parques y zonas verdes. Hay 109 botaderos de basura crónicos. Entre ellos, 55 son para sitios donde arrojan escombros, de los cuales 36 siguen activos 1 19 han sido intervenidos parcialmente por las autoridades de aseo, salud pública y medio ambiente de la ciudad.



Figura 5. Porcentajes de fuente de residuos de construcción y demolición en Cali.
Fuente: (Chavez, Mejia, & Bernal, 2010)

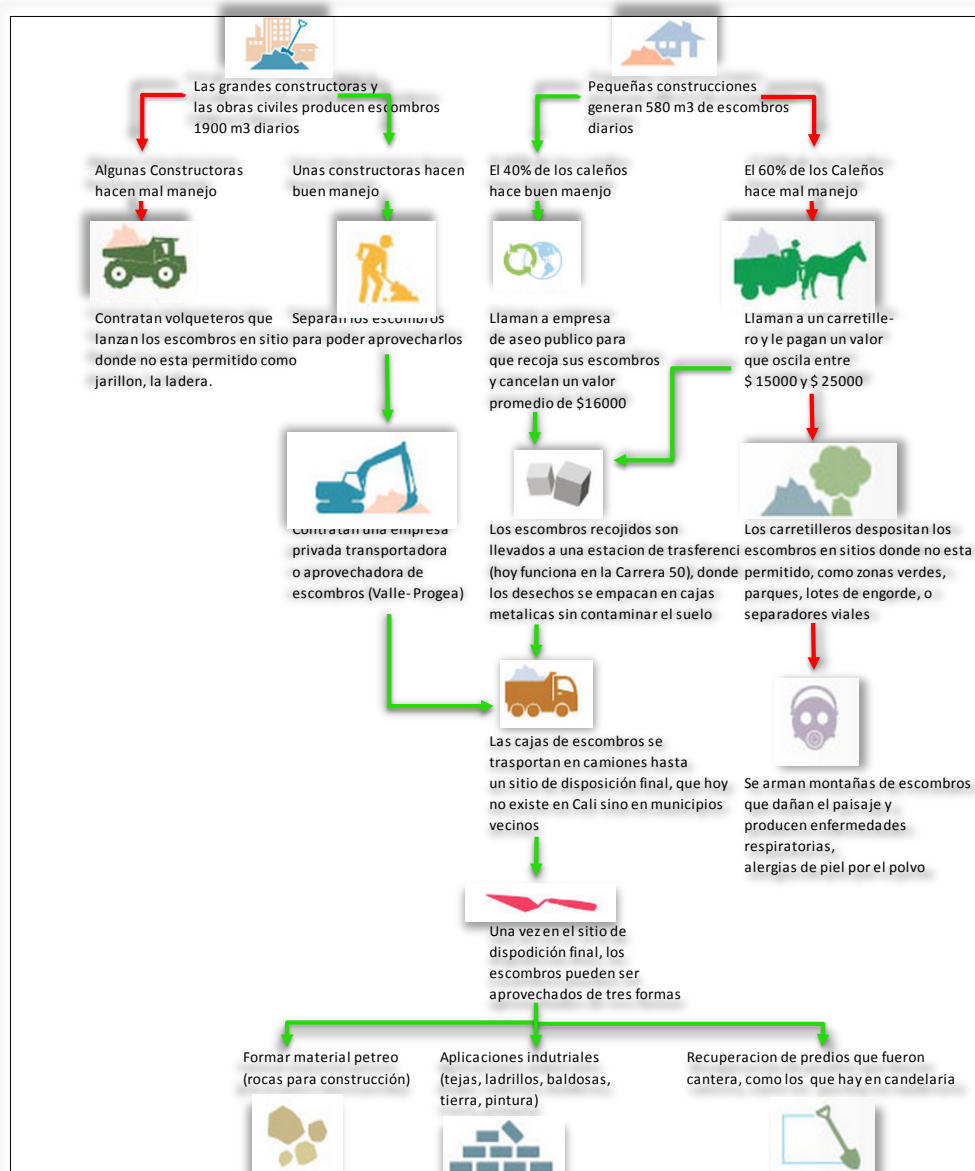


Figura 6. Esquema general del proceso de residuos de construcción en Cali.

Fuente: (Chavez, Mejia, & Bernal , 2010)

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología

En este capítulo se presenta la metodología que se llevó a cabo para poder determinar el comportamiento de un suelo fino al adicionarle 5% 10% 15% y 20% de concreto reciclado y 3% de cal.

Básicamente consiste en las siguientes fases:

- Descripción de los materiales (suelo, concreto reciclado y cal)
- Caracterización de cada material siguiendo las recomendaciones de las normas INVIAS en esta fase se describen los ensayos realizados.
- Se realiza la adición de cada porcentaje de concreto reciclado junto con el 3% de cal, se describen los ensayos realizados.
- Se presentan los resultados de todos los ensayos.

3.1.MATERIALES

3.1.1. SUELO FINO.

Localización En el barrio valle de Lili, al sur de la ciudad Santiago de Cali, entre las carreras 98 y 97 con calle 48, se construyen torren de apartamento paralelamente también se construyen las vías de acceso a estas torres. El material de suelo fino proviene de la subrasante de estas vías de acceso. Se trasporto cerca de 4 m³ y se garantizó que este material cumpliera con las normas INVIAS 2007 para el óptimo desarrollo de las pruebas a realizar.



Figura 7. Localización de la zona de extracción del suelo
Fuente: Tomada de Google Earth, 2014



Figura 8. Suelo en el sitio de extracción

3.1.2. GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA

Las características geológicas y morfológicas locales de Santiago de Cali se divide en dos grandes áreas: la primera, corresponde a la zona montañosa localizada al occidente de Cali, en donde predominan rocas volcánicas Cretácicas. La segunda zona, corresponde al Valle aluvial del río Cauca, compuesta por depósitos Cuaternarios recientes, que conforman la zona plana, la cual se extiende hacia el extremo oriental de la ciudad. Esta zona está cubierta parcialmente por abanicos aluviales sobre los cuales se ubica la mayor parte de la ciudad de Santiago de Cali. Según el mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica el sitio de donde proviene el suelo corresponde a la zona 6e Zona del abanico Meléndez y Lili, Esta zona abarca los abanicos de los ríos Meléndez y Lili, caracterizados por la presencia de una capa superficial de materiales limosos de consistencia dura de unos 10 m de espesor. La figura 9 muestra que la zona de donde extrajo el suelo corresponde a arcillas y/o limos que encuentran entre 1 y 5 metros de profundidad.

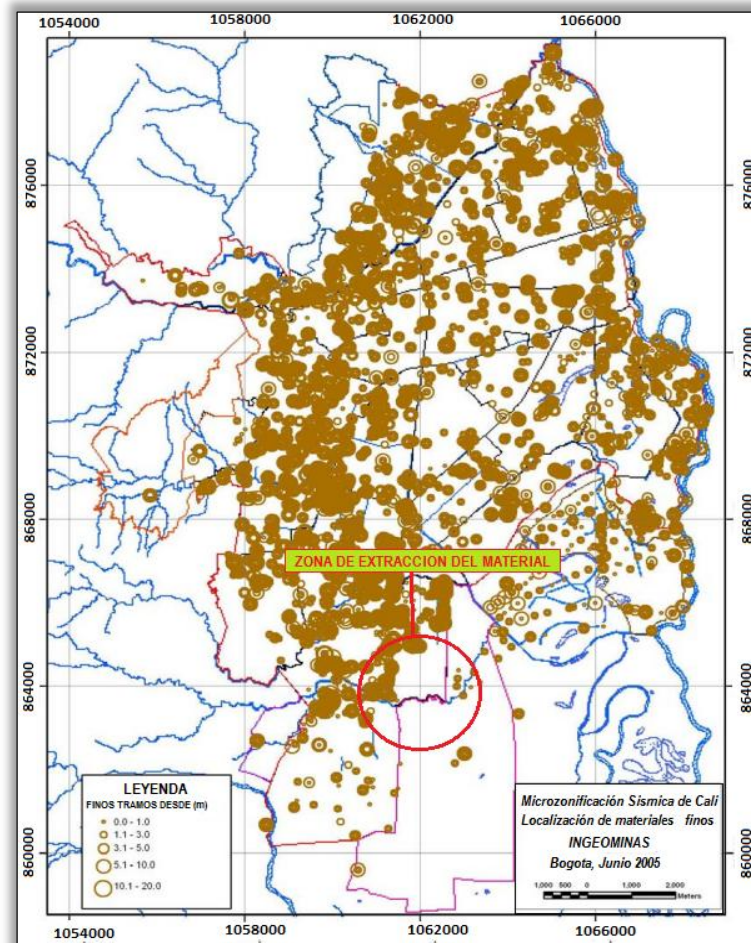


Figura 9. Distribución de estratos superficiales de materiales finos (Arcillas y Limos)
Fuente: (Ingeominas, 2005)

3.1.3. CONCRETO RECICLADO

Existen numerosas fuentes para adquirir este material, por facilidad y disponibilidad se decidió tomar un concreto reciclado proveniente de la demolición de una losa en el edificio de Ingeniería química en la Universidad del Valle, este material se encontraba ya triturado y almacenado en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería de materiales.



Figura 10. Concreto reciclado

3.1.4. CAL

Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, producto finamente dividido, que resulta de la hidratación de la cal viva con agua para satisfacer su afinidad química.



Figura 11. Cal hidratada para estabilizar suelos.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
(Cao) Total	Min. 70.0%
($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Disponible	Min. 93.0%
p.p.c: a 1000°C	Max. 27.0%
(MgO) Total	Max. 1.0%
Residuos Insolubles en HCl	Max. 1.5%
Contenido de S	Max. 0.1%
Contenido de SiO_2	Max. 0.5%
Contenido de Fe_2O_3	Max. 0.1%
Contenido de Al_2O_3	Max. 0.1%
Contenido de P	Max. 0.1%

Tabla 6 Características químicas de la Cal utilizada

3.2.PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL

3.2.1.1.Granulometría

Con el fin de determinar de forma cuantitativa la distribución del tamaño de partículas del suelo se realizó el ensayo de granulometría siguiendo el procedimiento descrito en I.N.V.E 123-07.

Se toma una muestra representativa de 300 gramos de suelo seco al horno, los cuales se lavan por el tamiz No 200, esto con el fin de eliminar todas las partículas finas presentes. La figura 12 muestra el proceso de lavado.



Figura 12 Lavado del suelo a través del tamiz No 200.

El material retenido en el tamiz No 200 se deposita en un recipiente y se lleva al horno nuevamente. Una vez seco este material se pesa para así determinar el porcentaje de material que se fue con el agua en el lavado, con respecto a los 300 g iniciales, si más del 50% se pierde en el lavado el suelo se clasifica como fino.

Con los gramos retenidos y secos se realiza el proceso de tamizado, para lo cual se utilizaron las mallas de numeración: 4, 8, 20, 40, 100 y 200.

Los resultados de este ensayo se presentan en la sección de resultados y análisis.

3.2.1.2.Hidrometría

El análisis del hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de las esferas, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido lo cual es conocido como la ley de Stokes.

Este ensayo se realiza bajo las indicaciones dadas en la norma I.N.V. E – 124 – 07. Se tomó una muestra de 50 g de suelo que pasa por el tamiz No 200 y secada al horno, esta muestra se depositó en un recipiente y se le añadió una solución de hexametáfosfato de sodio; al 4%, este caso se usaron 125 ml de este agente dispersante, se dejó reposar esta solución durante 24 horas. Pasado este tiempo se trasfiere la muestra anterior a un agitador mecánico durante un minuto después es llevada a la probeta de ensayo donde se agitó manualmente durante 1 minuto. En este momento se pone en marcha el cronometro para realizar las lecturas en el hidrómetro en determinados momentos. Para hacer las lecturas, se introduce lentamente el hidrómetro en la probeta, sin perturbar y leer lo que marque el hidrómetro, también se debe tomar la temperatura, cada vez que se haga una lectura el hidrómetro se retiró y se colocó en un recipiente con agua limpia. La figura 13 muestra parte del procedimiento para este ensayo.

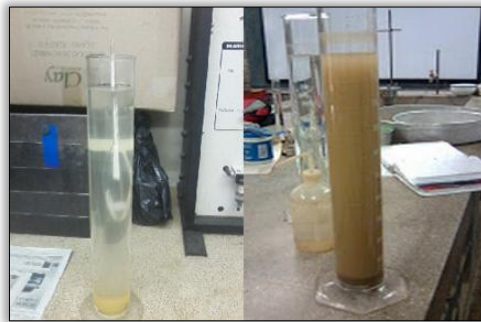


Figura 13 Toma lecturas con el Hidrómetro

3.2.1.3.Límites de consistencia

El contenido de humedad con el que se produce un cambio de estado varía de un suelo a otro, por ello es importante conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante de comportamientos diferentes del material. Cuando el contenido de agua es muy elevado, el suelo no tiene resistencia al esfuerzo cortante; al perder agua va aumentando esa resistencia.

- **Limite líquido (LL)**

Se realizó el procedimiento descrito en I.N.V. E – 125 – 07. se secó una muestra de suelo a temperatura ambiente para luego ser tamizada a través de la malla No 40, con 400 g de material que paso a través de esta malla se procedió a hacer el ensayo.



Figura 14 Cazuela de Casagrande y suelo para determinar Limite Liquido.

- **Limite plástico (LP)**

El procedimiento se realiza de acuerdo a lo descrito en la norma I.N.V. E – 126 – 07, se toma 20 gramos de suelo a los que se les añade agua, con este se empiezan hacer pequeños rollitos. Cuando se tenga una humedad en la que los rollitos se empiecen a agrietar sin desmoronarse y tengan un diámetro de 3mm, esa humedad corresponde al líquido pastico. Se tomaron tres testigos de humedad, para hacer un promedio y tener un valor más aproximado.



Figura 15. Rollos para determinar Limite Platico

3.2.1.4.Compactación- Proctor modificado

Con el fin de determinar la humedad óptima a la cual el suelo alcanza la densidad máxima, se realizó el ensayo de proctor modificado de acuerdo a la norma INV E 142-07, método B.

Inicialmente se prepara la muestra, lo cual consiste en secar el suelo en el horno para luego poderlo tamizar a través del tamiz No 4.



Figura 16 Tamizado a través de malla No 4

Con aproximadamente 7000 gramos de suelo tamizado se compactaron 4 moldes metálicos cada uno se compacto en cinco capas, a 56 golpes cada una de ellas. Cada se escarifica con el fin de garantizar adherencia entre ellas. La humedad en cada molde varía. Luego de la compactación cada molde se enraza, se pesa y se le toma un testigo de humedad de acuerdo con la norma INV E 122-07

El peso unitario seco del suelo y el porcentaje de humedad se determinan de la siguiente manera respectivamente:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \% w}$$

Ecuación 2.

$$\% w = \frac{w1-w2}{w2-wR} * 100$$

Ecuación 3.

Donde:

w1: Peso del recipiente y del suelo húmedo.

w2: Peso del recipiente y el suelo seco.

wR: Peso del recipiente.

γ_d : Peso unitario seco.

γ_h : Peso unitaria húmeda.

% w: Humedad de la muestra con base en la masa seca del suelo en el horno.



Figura 17. Proceso de compactación de moldes para ensayo de proctor.

3.2.1.5.CBR del suelo

Con el fin de determina un índice de resistencia del suelo tipo subrasante se realizó la relación de soporte california, los materiales, equipos y procedimientos se describe en

la norma **I.N.V. E – 148 – 07**. El resultado de este ensayo se toma para métodos de diseño.

- **Preparación de la muestra:** se secaron aproximadamente doce muestras de 7000 gramos de suelo, para luego triturarlos y así reducir el tamaño de partícula de tal forma que pase a través del tamiz N0 4.



Figura 18 Trituración y tamizado del suelo

- **Compactación:** se compactaron 12 moldes cada uno con 7000 gramos de suelo, el diámetro y la altura de cada molde es de 6 y 5 pulgadas respectivamente. Cada molde se compacto en 5 capas cinco moldes se compactaron a 56 golpes, cuatro moldes a 25 golpes y cinco a 12 golpes.



Figura 19 Compactación de moldes para CBR

- **Inmersión:** todos los moldes se sumergen por completo en agua, se coloca en la parte superior unas pesas que simulan las capas de pavimento, se introducen en agua y con un deformimetro se toma una lectura inicial luego de cuatro 4 días se toma otra lectura con el deformimetro para determinar la expansión.



Figura 20 Inmersión de moldes compactados y toma de lectura inicial.

- **Penetración:** pasados los cuatro días los moldes se retiran, se dejan escurrir durante 4 horas para permitir la disipación de poros luego se llevan a la prensa y se penetran con un pistón de 3 pg^2 de área, en donde se toma lecturas de deformación y esfuerzo.



Figura 21 Penetración de los moldes en la prensa CBR

3.2.1.6. Ensayo de compresión inconfiada

Este ensayo permite determinar de forma rápida un valor aproximado de la resistencia del suelo en términos de esfuerzos totales. Se puede aplicar a muestras de suelo inalteradas y alteradas.

De acuerdo con la norma en I.N.V. E – 152 – 07. Las probetas de suelo deben tener una relación de altura y diámetro entre 2 y 2.5, el diámetro debe ser mayor a 30mm el tamaño de las partículas deben ser aproximadamente $1/10$ del diámetro de la probeta.

- **Preparación de la muestra:** se seca el suelo al horno, se tritura y se tamiza a través
- **Probetas Remoldeadas:** se debe garantizar que cada probeta esté en condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima, valores que se encontraron en el ensayo de compactación.



Figura 22 Fondo, cilindro tubular y cilindro sólido para remodelar la muestra

La figura 22 muestra el equipo que se utilizó para remodelar las probetas, consta de un falso fondo, un pistón sólido y un cilindro tubular con diámetro interno de 7.1 cm y una altura efectiva de 15 cm con estos dos datos se calculó el volumen con el que se determina la cantidad de agua y suelo, que garantizaran humedad óptima y densidad seca máxima.

- **Compresión de probetas:** las probetas son llevadas a la máquina de compresión simple, se asegura el contacto entre la probeta y la máquina, se pone en ceros el deformímetro y con una palanca manual se empieza a transmitir un esfuerzo axial a una velocidad constante de 50×10^{-4} pg/min hasta que la muestra falle. Durante este proceso se tomaron datos de esfuerzo y deformación.

De cada probeta fallada se tomó de su núcleo un pequeño porcentaje de suelo que se lleva al horno para determinar la humedad y el peso específico seco.



. Figura 23 Compresión de Probetas

3.2.1.7. Ensayo de permeabilidad con curva de Taylor.

La constante permeabilidad K , se calculó indirectamente con el ensayo de consolidación descrito en la norma INV E – 151. (Método A). La consolidación consiste en la deformación del suelo debido a reducción de relación de vacíos del suelo con el paso del tiempo y con la variación de presión de poros. Para ellos se restringe la muestra de suelo lateralmente y se carga axialmente con escalones de carga, se toman lecturas de tiempo y deformación hasta que el exceso de presión de

agua en los poros se disipe. En la figura 24 se indica la muestra de suelo y el equipo utilizado para el ensayo. El consolidometro mantiene fijo el anillo con la muestra de suelo para que el dispositivo de carga aplique axialmente la carga durante el tiempo necesario del ensayo, el deformimetro marca la deformación del suelo.



Figura 24 Muestra de suelo en el Consolidometro.

La muestra de suelo para el ensayo se obtuvo de una probeta remoldeada en condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima, la cual se talla hasta que entre bajo presión en el anillo. Con las lecturas de tiempo y deformación se grafica la curva de Taylor.

$$k = C_v * \gamma_w * \frac{a_v}{1 + e_0}$$

Ecuación 4.

Donde:

C_v : Coeficiente de consolidación.

γ_w : Peso específico del agua.

k : Coeficiente de permeabilidad.

a_v : Coeficiente de pre consolidación.

e_0 : Índice de vacíos inicial

La relación de vacíos inicial y final del ensayo se calculan con las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$e_0 = \frac{(h_0 * A) - \frac{W_s}{G_s}}{\frac{W_s}{G_s}}$$

Ecuación 5.

$$e_f = \frac{(h_f * A) - \frac{W_s}{G_s}}{\frac{W_s}{G_s}}$$

Ecuación 6.

Donde:

W_s =Peso de los sólidos

h_0 = Altura inicial

A = Area

G_s = Gravedad específica de la muestra

Coeficiente de compresibilidad a_v en cm^2/K de calcula:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

Ecuación 7.

Δe : $e_i - e_f$

Δp : Cambio en el incremento de carga.

El coeficiente de consolidación C_v , se calcula:

$$C_v = \frac{T * H^2}{t_{90}}$$

Ecuación 8

Donde:

T : Factor de tiempo (0,848) para el 90% de la consolidación primaria.

H : Distancia de drenaje.

t_{90} : Tiempo para el que ocurre el 90% de consolidación primaria. Que se calcula de la curva de Taylor.

Dependiendo valor de k , el suelo se clasifica de la siguiente manera:

Permeabilidad relativa	Valores de k (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$>1 \times 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	1×10^{-1} a 1×10^{-3}	Arena, arena fina
Poco permeable	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	1×10^{-5} a 1×10^{-7}	Limo y arenisca fina
Impermeable	$>1 \times 10^{-7}$	Arcilla

Tabla 7 Valores típicos de permeabilidad

3.2.1.8.Gravedad específica del suelo natural.

Se toman 50 gramos de suelo seco que pasan a través de la malla No 10, se introduce este suelo en un matraz y se llena con agua una cantidad determinada. A esta mezcla se le succionan los vacíos con una bomba de vacío, luego se pesa y se toma la temperatura. Este suelo es llevado al horno con el fin de determinar el peso de los sólidos.



Figura 25. Gravedad específica del suelo

3.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO RECICLADO

Los ensayo de laboratorio que se realizaron fueron: granulometría, hidrometría, gravedad específica y absorción, los cuales se describen a continuación:

3.2.2.1. Ensayo de granulometría por tamizado

Se sigue el procedimiento descrito en I.N.V. E – 123 – 07, para ello se tomó una muestra representativa de concreto reciclado triturado, la cual se seca y pesa para luego lavarla a través del tamiz No 200, de esta forma se elimina el material fino presente en la muestra. El suelo retenido en la malla es llevado al horno, se seca y se pesa para poder calcular el porcentaje de material que se fue en el lavado. El material pesado se tamiza por las mallas: 3/8", No 4, N°8, N°20, N°40, N°100 y N°200.



Figura 26 Lavado y tamizado del concreto reciclado.

El material retenido en cada malla o tamiz se pesa, y así determinar el porcentaje de material que se retiene en cada malla.

3.2.2.2. Gravedad específica y Absorción.

Según I.N.V. E – 222 – 07 la Gravedad específica es relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

- **Determinación de condición saturada superficialmente seca.**



Figura 27 Pistón metálico y recipiente cónico para determinar condición SSS

Se tomó una muestra representativa de concreto triturado, aproximadamente 1500 gramos los cuales se colocaron en un recipiente, se añadió agua y se dejó durante 24 horas para que las partículas se saturan. Después de 24 horas en el agua, el material se

dispone en una bandeja metálica para que se seque a temperatura ambiente, se revuele constantemente el material para que el secado sea lo más homogéneo y uniformemente posible.

Para poder determinar la condición saturada superficialmente seca, (SSS), se pone el material en el recipiente cónico, con el pistón metálico se dan 25 golpes al material, se divide en tres capas, a las dos primeras se les da ocho golpes y a la tercera nueve golpes. Se retira el recipiente cónico, si existe presencia de humedad superficial, el cono de material conservará su forma. La condición SSS queda determinada cuando las paredes del cono que se forma al retirar el recipiente cónico se despendan pero su altura se conserva.

Con las condiciones de humedad de este material se puede determinar la gravedad específica, siguiendo el procedimiento descrito en I.N.V. E – 223 – 07. Se introduce cierto porcentaje de material en condición SSS en un matraz, y una cantidad de agua, se pesa para extraer el aire presente con la ayuda de una bomba, esto se muestra en la figura 28.



Figura 28 Extracción del aire de muestra de concreto reciclado

Garantizando que todo el aire a salido se enrasa el matraz y se pesa. Este material se deposita en un recipiente y se lleva al horno para tener el peso seco de esta muestra.

3.2.2.3.Hidrometría

El procedimiento se sigue de acuerdo a la norma INV E 124-07, se tamiza en la malla No 200 aproximadamente 60 gramos de concreto triturado, estos se llevan al horno por 24 horas y luego se toman 50 gramos para ser depositados en un recipiente de vidrio y se le añadió una solución de hexametáfosfato de sodio; al 4%, este caso se usaron 125 ml de este agente dispersante, se dejó reposar esta solución durante 24 horas, se llevó esta mezcla al agitador mecánico durante 1 minuto, luego el material se deposita en una probeta de vidrio donde se toman las lecturas con el hidrómetro.

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NATURAL

4.1.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

El peso inicial de la muestra es de 300 gramos, la cual después de lavarse por el tamiz 200 y llevarse al horno pesa 52.88 gramos. Es decir que el 82.58% de la muestra corresponde a partículas finas que se fueron con el agua durante el lavado. Los 52.88 gramos corresponden al 17.42% y con este porcentaje se realizó el ensayo.

Los 52.88 gramos se tamizaron por las mallas: N°4, N°8, N°20, N°40, N°100 y N°200 aunque teóricamente no debería existir partículas que pasen la malla N°200, en el proceso de tamizado se encontró que 25,4 gramos pasan esta malla. Esto se debe que en el lavado algunas partículas no se disgregaron bien y que durante del tamizado se trituraron hasta tamaños de partículas con diámetros inferiores a 0,075 mm

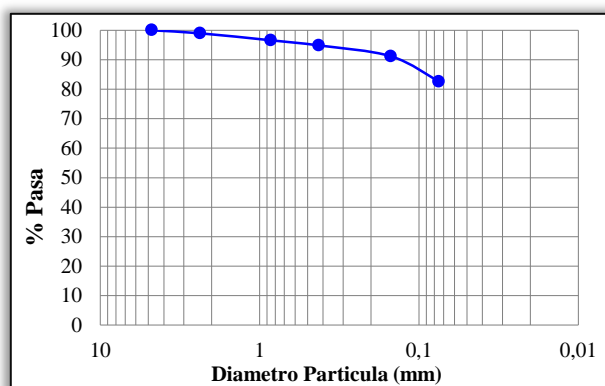


Figura 29 Curva granulométrica del suelo-Tamizado

Los 52.88 gramos de suelo con los que se hizo el ensayo se distribuyen en 6 diámetros de partícula que varían entre 0.075 y 5mm tal y como se muestra en la figura 29. De acuerdo con la curva granulométrica el suelo tamizado es una arena fina, media y gruesa. La tabla 7.1 en anexo A muestra en detalle los cálculos.

4.1.2. RESULTADOS DE HIDROMETRIA

El hidrómetro es un método para determinar de forma indirecta los porcentajes de partículas que pasan por el tamiz No 200, hasta 0.001 mm, se basa en el principio de sedimentación de un material en suspensión en líquido.

En el ensayo granulométrico por tamizado se determinó que el 82.58% del material pasó a través del tamiz No 200, por esta razón es necesario conocer como es el comportamiento de las partículas finas. Con el ensayo del hidrómetro se determina el porcentaje de arcilla, es decir el porcentaje más fino que 0.002 mm, pues la conducta

de la fracción de suelo cohesivo depende principalmente del tipo y porcentaje de arcilla que el suelo presente.

El ensayo se realizó con 50 gramos de suelo que pasan el tamiz No 200, el procedimiento se describió en el capítulo anterior en la sección 3.2.1.3. Los resultados de este ensayo se muestran en la figura 28 la cual muestra la distribución de partículas.

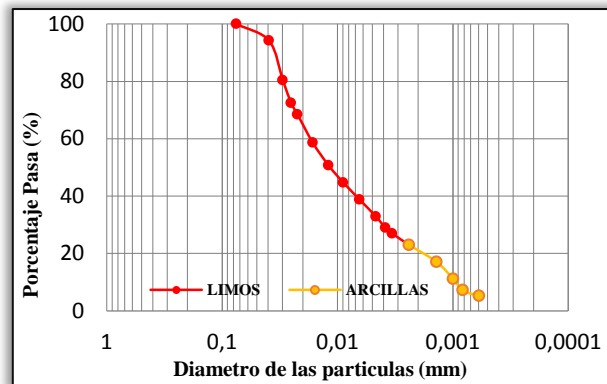


Figura 30 Curva Granulométrica del suelo-Hidrómetro

La figura 30 muestra el contenido de arcilla en la muestra de suelo corresponden a las partículas más finas a 0,002 mm. La tabla 7.2 en anexo A muestra en detalle los cálculos.

La figura30 la curva granulométrica del suelo solo donde se muestran los resultados del ensayo por tamizado y los resultado del ensayo con hidrómetro.

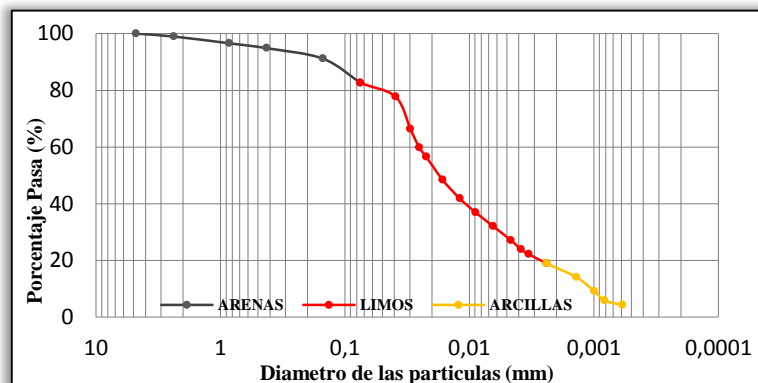


Figura 31 Curva Granulométrica del suelo natural

4.1.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

La presencia de arcilla en el suelo hace que este se pueda moldear bajo la presencia de determinada humedad sin que desmorone, esto se debe a la cohesión que existe entre partículas.

Límite líquido: En la figura 32 se grafican los resultados obtenidos del ensayo, se muestra la humedad y el número de golpes con los cuales la ranura de suelo se cerraba aproximadamente 11 milímetros.

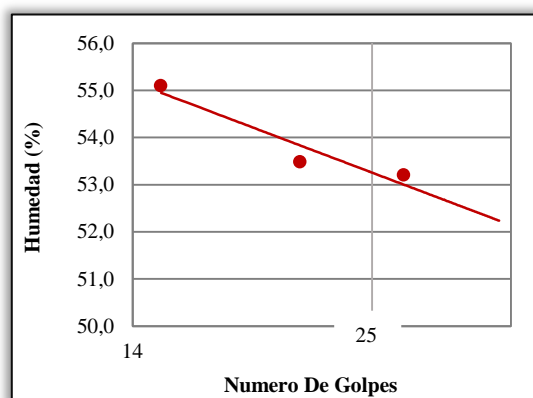


Figura 32 Determinación de límite Líquido.

Según la figura 32 el porcentaje de humedad correspondiente a los 25 golpes es de 53.2 %

Límite plástico: Se toman testigos de humedad de los rollitos de suelo, los datos y cálculos se muestran en la tabla 7.

Peso de recipiente + muestra húmeda (g)	22.95	22.47	23.32
Peso del recipiente + muestra seca (g)	21.48	21.29	22.2
Peso recipiente	17.07	17.88	18.99
Numero de recipiente	236	13	278
Humedad %	33.3	34.6	34.9

Tabla 8 Datos para calcular el límite plástico del suelo natural.

El valor correspondiente al límite plástico es 33.4, este valor es el promedio de las tres humedades que aparecen en la tabla 9. La tabla 7.3 en anexo A muestra en detalle los cálculos.

Índice de plasticidad: Con los valores de límite líquido y el límite plástico se puede calcular el índice de plasticidad (IP), mediante la siguiente relación:

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 9

$$IP = 18,9\%$$

4.1.4. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Según el SUCS el suelo se clasifica como suelo fino ya que más del 50% del material pasa a través de la malla No 200.

Esta clasificación del suelo da como resultado que se trata de un limo de alta plasticidad.

Este sistema denota con la C a las arcillas inorgánicas, M a los limos inorgánicos y O para limos orgánicos. Además de estos otros símbolos, L para baja plasticidad con límite líquido menor que 50% y H para alta plasticidad, con límite líquido mayor que 50%

Con los resultados del límite líquido y del índice de plasticidad se puede clasificar el suelo de acuerdo con la carta de plasticidad mostrada en la figura 33.

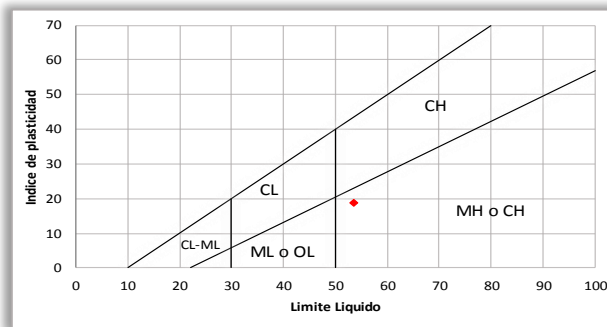


Figura 33 Carta de plasticidad-Clasificación del Suelo

Con un límite líquido de 52.7% y un Índice de plasticidad de 19.55% se ubica el suelo en la figura 33. **MH**: Limos de alta plasticidad. Es de esperarse este resultado de acuerdo con la geología de la zona de recolección del material, pertenecientes a conos aluviales.

4.1.5. RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO

La razón de este ensayo es determinar dos parámetros del suelo, la densidad seca máxima y la humedad óptima a la cual se la consigue. La figura 34 corresponde a la curva de compactación, en la que se muestran los resultados del ensayo de proctor estándar.

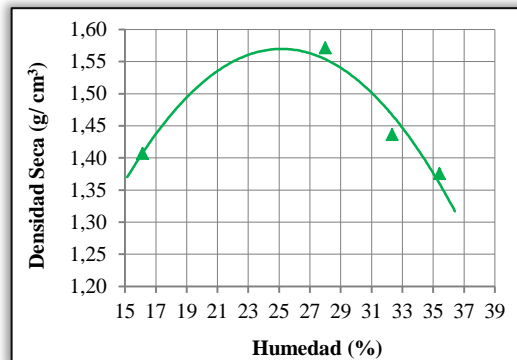


Figura 34 Curva de compactación.

Para determinar la densidad máxima del suelo en la figura 34 se toma el valor máximo que adquiere la curva en las ordenadas, la humedad correspondiente a ese valor máximo es la humedad óptima.

La densidad seca máxima es:

$$\gamma_{max} = 1.57 \text{ g/cm}^3$$

Y la humedad óptima:

$$w_{optima} = 25\%$$

Estos dos resultados se utilizan cuando se remolde las probetas para el ensayo de compresión simple y de consolidación

4.1.6. RESULTADOS DE ENSAYO C.B.R

EL procedimiento de este ensayo se describió en la sección 3.2.1.5. Las curvas que se muestran en la figura 35 son el resultado de la compactación de los moldes a diferente número de golpes por capa. Se observa que para un mayor número de golpes se tiene un peso unitario seco mayor y una humedad óptima menor. Esto se presenta porque al ser mayor el número de golpes, parte del aire presente en el suelo sale y el agua tendrá que cubrir menos espacios libres, por el contrario si es menor el número de golpes habrá más aire en el suelo y se necesita que más agua para cubrir los espacios libres.

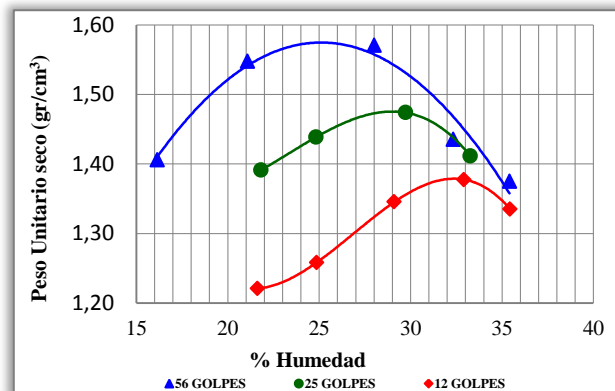


Figura 35 Curvas a diferentes energías de compactación.

- **Curvas de expansión**

Todos los moldes compactados se sumergieron en agua para así poder determinar el porcentaje de expansión del suelo en condición saturada. Para esto se toma una lectura inicial del nivel suelo en el molde al momento de ser sumergirlo y una lectura final del nivel del suelo en el molde luego de 4 días de estar sumergido en agua. El porcentaje de expansión corresponde a la relación entre diferencia de la lectura final y la inicial sobre la altura inicial del molde.

La tabla 10 muestra las lecturas iniciales, las lecturas finales y el porcentaje de expansión, además también se muestra la humedad con la que fue compactado cada molde con el fin de mostrar la relación que existe entre estas dos variables. Se puede

observar que los mayores porcentajes de expansión se presentan en los moldes que fueron compactados a menor humedad y con mayor número de golpes.

Con los resultados de expansión y humedad de la tabla 10 se realizó las curvas de expansión de la figura 36. Según la norma INVIAE la expansión en un suelo tipo subrasante no debe superar el 2%. Según la figura 36, para un porcentaje de expansión de 2% corresponde una humedad de 25% esto significa que humedades menores harán que el suelo expanda más del porcentaje admisible.

Numero De Golpes	Molde	Lectura Inicial (0.001 Pl)	Lectura Final (0.001 Pl)	Expansión (%)	Humedad (%)
56	1	0	25	0.5	35.41
	2	0	33	0.66	32.34
	3	0	59	1.18	28.01
	4	0	165	3.3	21.09
	5	0	251	5.02	16.15
25	6	224	359	2.7	21.81
	7	61	155	1.88	24.83
	8	125	169	0.88	29.73
	9	9	44	0.7	33.27
12	10	150	251	2.02	21.62
	11	562	626	1.28	24.86
	12	100	132	0.64	29.10
	13	840	850	0.2	32.91
	14	66	72	0.12	35.44

Tabla 9 Lecturas de Expansión del suelo

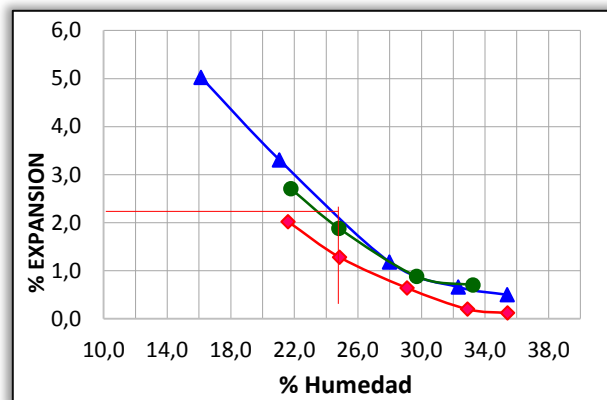


Figura 36 Curvas Expansión

- **Curvas de esfuerzo vs penetración**

Luego de los 4 días de estar sumergidos, los moldes se retiraron del agua, se dejaron escurrir aproximadamente 4 horas, pasado este tiempo se hace el ensayo de penetración a cada molde, en este ensayo se realizan lecturas del esfuerzo necesario para que un pistón penetre el suelo a una velocidad determinada y constante.

La figura 37 (a), (b) y (c), muestran las curvas de esfuerzo deformación de los moldes compactados a 56, 25 y 12 golpes respectivamente. Muchas de estas curvas tienen un comportamiento cóncavo hacia arriba al inicio, esto se debe a las irregularidades del suelo o errores del ensayo, en estos casos se debe hacer una corrección de la curva. Las correcciones se hacen de acuerdo a lo descrito en la norma I.N.V. E 169-07 en la figura 3 de esta misma norma.

De las curvas corregidas y de las

De las curvas corregidas y de las que no necesitan corrección, se toma los valores de los esfuerzos correspondientes 0,1 y a 0,2 pulgadas de penetración, se divide estos valores entre los valores patrón, 1000 y 1500 respectivamente, como se necesita un porcentaje se multiplica por 100 cada valor, el mayor de estos dos valores, corresponde al porcentaje de CBR.

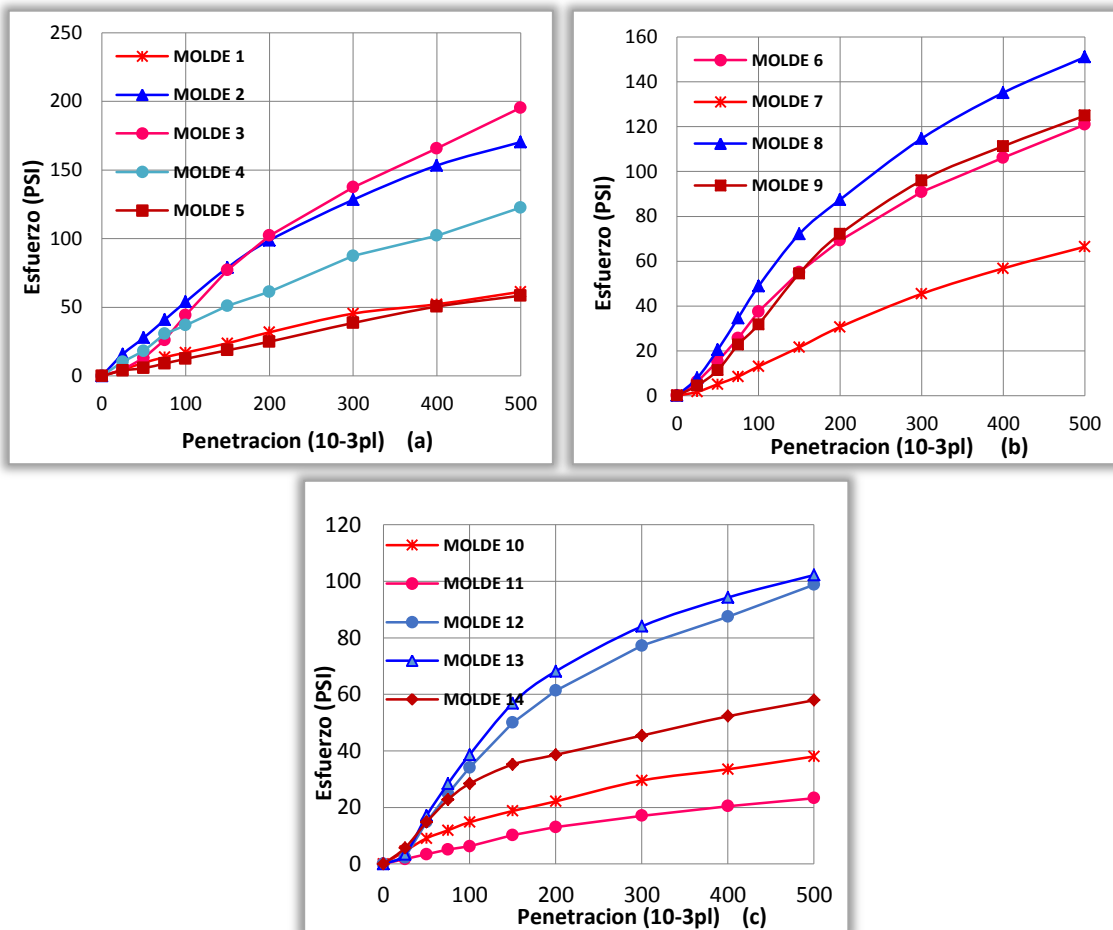


Figura 37 Grafica Esfuerzo-Penetración para moldes compactados a 56, 26 y 12 Golpes.

Los valores de los esfuerzos a 0.1 y 0.2 pulgadas de cada curva se muestran en la tabla 10, el resultado de dividir los esfuerzos entre los esfuerzos patrón se muestran en porcentaje en la tabla 11 en esta tabla también se muestra el mayor valor que corresponde al valor de CBR.

Moldes compactados a 56 golpes		Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5
	Esf 0,1 " (Lb/Plg ²)	17.04	53.94	67.00	37.00	14.00
	Esf 0,2 " (Lb/Plg ²)	31.80	98.80	115.00	61.33	28.00
Moldes compactados a 25 golpes		Molde 6	Molde 7	Molde 8	Molde 9	
	Esf 0,1 " (Lb/Plg ²)	17.00	40.00	52.00	44.00	
	Esf 0,2 " (Lb/Plg ²)	32.00	71.00	91.00	78.00	
Moldes compactados a 12 golpes		Molde 10	Molde 11	Molde 12	Molde 13	Molde 14
	Esf 0,1 " (Lb/Plg ²)	14.76	6.25	40.00	46.00	28.39
	Esf 0,2 " (Lb/Plg ²)	18.74	13.06	64.00	70.00	38.61

Tabla 10 Esfuerzos corregidos a 0,1 y 0,2 Pulgadas de penetración.

Moldes compactados a 56 golpes		Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5
	CBR 0,1 "	1.7	5.4	6.7	3.7	1.4
	CBR 0,2 "	2.1	6.6	7.7	4.1	1.9
	%CBR	2.1	6.6	7.7	4.1	1.9
Moldes compactados a 25 golpes		Molde 6	Molde 7	Molde 8	Molde 9	
	CBR 0,1 "	1.7	4.0	5.2	4.4	
	CBR 0,2 "	2.1	4.7	6.1	5.2	
	%CBR	2.1	4.7	6.1	5.2	
Moldes compactados a 12 golpes		Molde 10	Molde 11	Molde 12	Molde 13	Molde 14
	CBR 0,1 "	1.5	0.6	4.0	4.6	2.8
	CBR 0,2 "	1.2	0.9	4.3	4.7	2.6
	%CBR	1.5	0.9	4.3	4.7	2.8

Tabla 11 Porcentajes de CBR.

Siguiendo lo descrito en la norma INV E 148-07, en la figura 38 se determinó la humedad del suelo que genera una expansión admisible de 2%, esta humedad es de 25%, para evitar expansión del suelo fuera de los límites se toma un rango de humedades por encima de este valor, esto se muestra en la figura 38 (b). Por esta razón se toma como humedades: 25%, 27% y 29%.

La figura 38 (a) y 38 (c) se trazó líneas que indican en rango de humedades, estas líneas cortan las curvas de compactación y de CBR, se toman los valores

correspondientes al peso específico y los valores del porcentaje CBR de cada curva en el punto donde la línea corta a la curva.

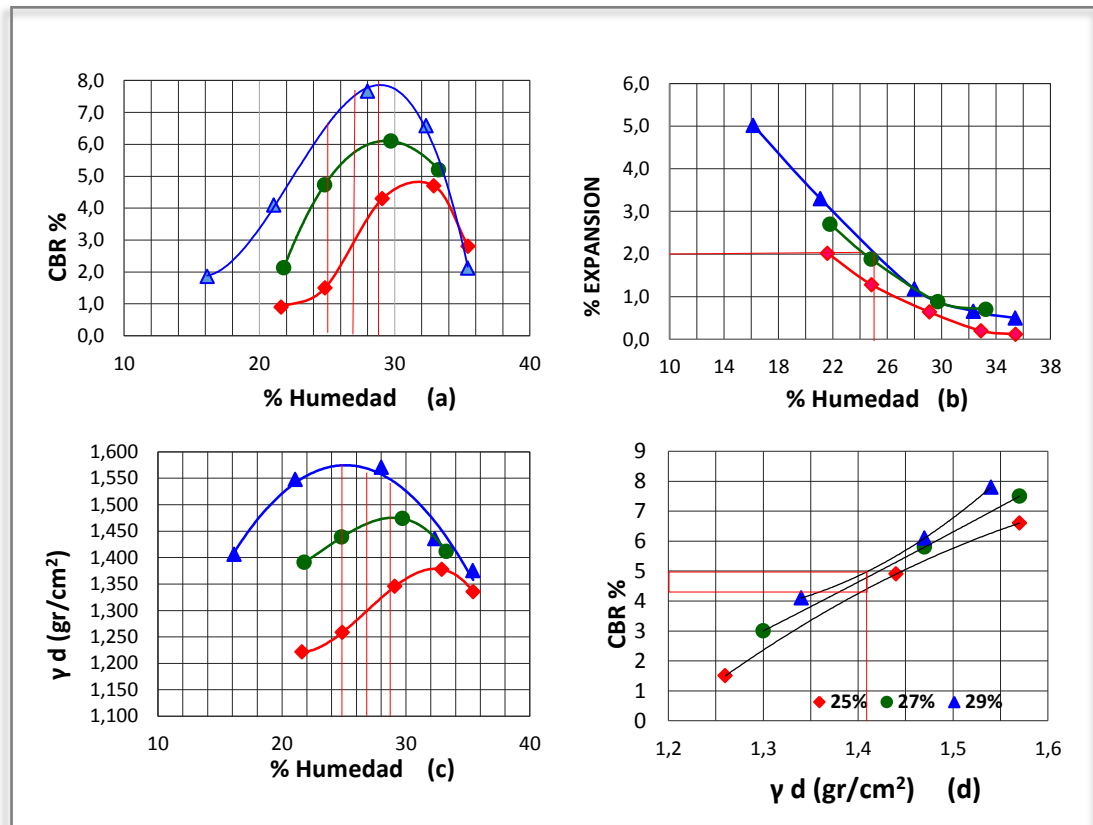


Figura 38 Determinación del CBR para un rango de humedades y masa unitaria seca mínima

HUMEDADES	γd (gr/cm ²)	CBR %
25%	1.26	1.5
	1.44	4.9
	1.57	6.6
27%	1.3	3
	1.47	5.8
	1.57	7.5
29%	1.34	4.1
	1.47	6.1
	1.54	7.8

Tabla 12 Valores de pesos específicos y porcentajes de CBR

La figura 38 (d) se realiza con los valores de la tabla 13. Cada curva representa la variación del CBR de acuerdo con el peso específico seco del suelo para una

humedad determinada. Según la norma INV E 142-07 en una subrasante se debe garantizar el 90% del valor de peso específico seco que se encontró en el ensayo de proctor, en este caso valor el valor máximo es 1.57 g/cm^2 y el 90% de este valor es 1.41 kg/cm^2 . Desde este valor se traza una recta que corte las tres líneas, tal como se muestra en la figura.

Con 90% del peso específico máximo y con una humedad 29% se obtiene un CBR de 5%, para una humedad del 25% de obtiene un CBR 4.5%. De esta forma queda determinado un rango de CBR. Tomando como valor de diseño el valor mínimo del rango es decir 4.5%. Las tablas 7.6, 7.7, 7.8 en anexo A muestra en detalle los cálculos.

4.1.7. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

.Se debe tener en cuenta que el suelo se encuentra en condiciones alteradas pues fue traído desde el sitio de la obra hasta el laboratorio, por esta razón para las probetas que se fallan a compresión simple se deben remoldear, estas deben tener las condiciones de densidad seca máxima y humedad optima estos dos valores se encontraron con el ensayo de compactación.

Las probetas se fallaron inmediatamente después de ser desmontadas del molde cilíndrico, la figura 35 muestra dos curvas de esfuerzo deformación unitaria; el valor máximo de cada curva corresponde al esfuerzo máximo que resiste el suelo antes de agrietarse y fallar.

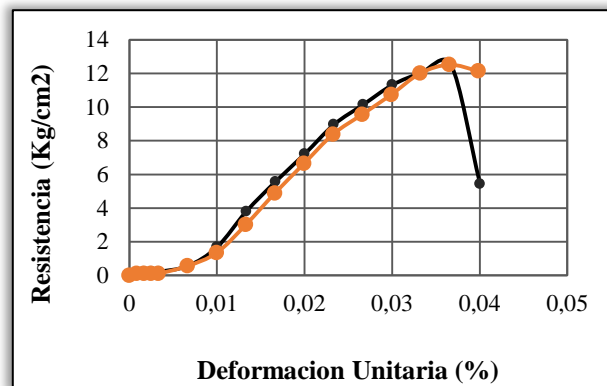


Figura 39 Curva de esfuerzo deformación

Se observa que las dos curvas tiene valores aproximados, la curva de color naranja corresponde al probeta 1 la cual se remoldeo al 98% de la densidad máxima seca, y al 97% de la humedad óptima, la resistencia máxima a compresión Inconfinada es de 12.5 Kg/cm^2 con una deformación unitaria es de 0.036 o 3.6%.

La curva de color negro corresponde a la curva de esfuerzo deformación de la probeta 2, esta probeta fue remoldeada al 98.3% de la densidad máxima del suelo y con el

98.6 de la humedad óptima. La resistencia máxima a la compresión Inconfinada es de 12.8 Kg/cm^2 y la deformación unitaria es de 0.035 o de 3.5 %.

Como valor promedio, la resistencia del suelo a compresión Inconfinada es 12.65 Kg/cm^2 y la deformación unitaria es de 35.5 %. La tabla 7.9 en anexo A muestra en detalle los cálculos.

4.1.8. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON CURVA DE TAYLOR

Mediante el método indirecto de la curva de Taylor del ensayo de consolidación se calcula el coeficiente de permeabilidad k , no se realizó el análisis por métodos directo por que al tratarse de un limo esto tomaría mucho tiempo.

El coeficiente de permeabilidad calculado para el suelo natural fue de 1.52196×10^{-8} , es un coeficiente típico para un suelo fino, que clasifica al suelo como impermeable según la tabla 8. La curva de Taylor los datos y cálculos se 7.10 del anexo A.

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO RECICLADO

4.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA AL CONCRETO

La muestra inicial para este ensayo fue de 412.11 gramos los cuales se lavaron por el tamiz No 200 para eliminar las partículas finas inferiores a 0.075 mm. Se encontró que en este proceso se perdieron 28.14 gramos que corresponde a un 6.7% es decir que el ensayo se hizo con 395.05 gr que corresponden al 93.3% de la muestra inicial.

El resultado del ensayo se representa mediante la curva de granulometría de la figura 39.

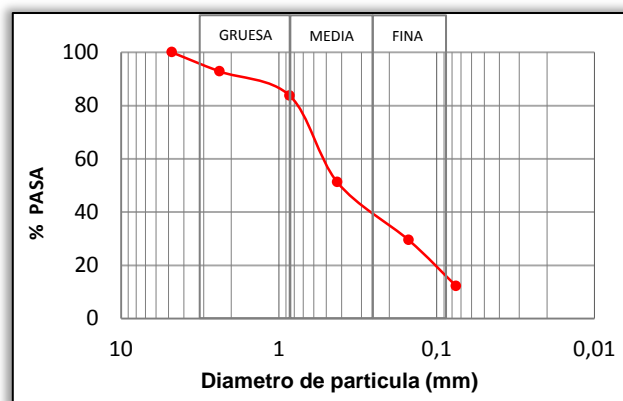


Figura 40 Curva Granulométrica concreto reciclado-Tamizado

La curva granulométrica de la figura 39 muestra que el tamaño de partículas del concreto reciclado triturado con el que se trabajó esta entre 0.075 y 5mm correspondientes al 93.3% de la muestra inicial. Debido al porcentaje y al tamaño de partículas el concreto reciclado triturado se considera como una arena. Hay una distribución de tamaños de partículas correspondientes a los de arena fina, media y gruesa, además un pequeño porcentaje de grava con diámetro entre 2.5 y 4.8 mm. La tabla 7.11 en anexo B muestra en detalle los cálculos.

4.2.2. RESULTADOS DE HIDROMETRÍA

Este ensayo se realizó con 50 gramos de material que pasaron por el tamiz no 200, los resultados se muestran en la curva de distribución granulométrica de la figura 40.

En el ensayo de granulometría por tamizado se realizó el lavado del material para así eliminar las partículas finas, se encontró que estas representaban el 6.7% de la muestra inicial. Por esta razón la mejor forma de clasificar el concreto reciclado por su tamaño es con el ensayo granulométrico por tamizado pues el material fino representa un pequeño porcentaje. La tabla 7.12 en anexo B muestra en detalle los cálculos.

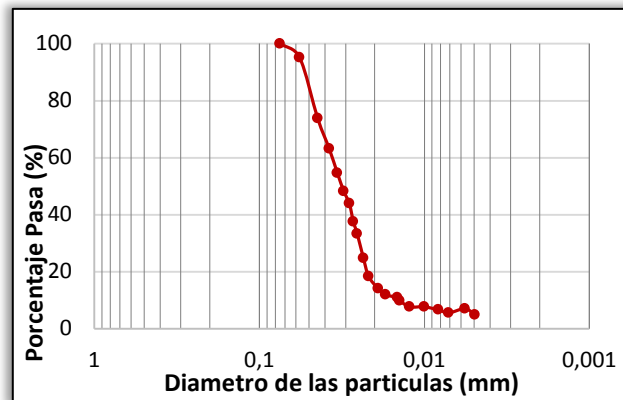


Figura 41 Curva Granulométrica concreto reciclado-Hidrómetro.

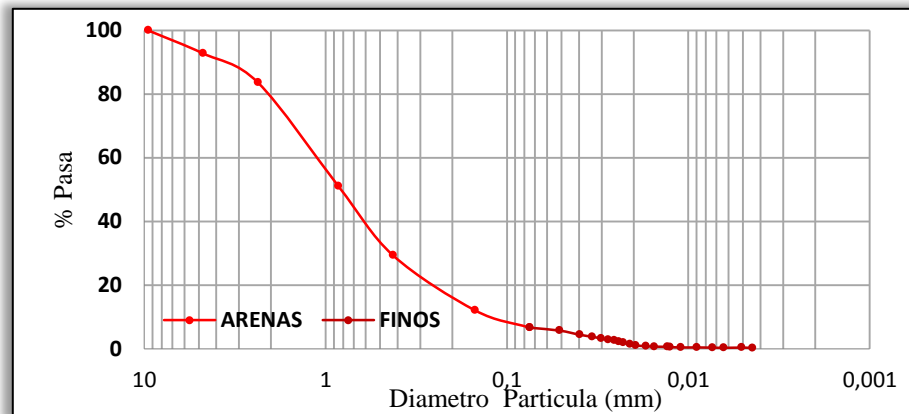


Figura 42 Curva Granulométrica-Concreto reciclado

4.2.3. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y POROSIDAD

Cada partícula de concreto triturado está constituida por una parte sólida y otra de pequeños huecos o poros. Según la norma I.N.V. E – 223 – 07 la gravedad específica es la relación entre la masa de un volumen de sólidos y el volumen del agua a una temperatura establecida.

La tabla 14 muestra los datos necesarios para el cálculo de la gravedad específica y para determinar la absorción de las partículas de concreto reciclado.

Datos	Muestra 1	Muestra 2
Peso C.R. SSS+ matraz	199.6	303.2
Peso matraz +C.R. + agua	449.3	848.3
Peso matraz +agua	332.9	671.1
Peso del recipiente	59.8	83.5
Temperatura	74.0	72.0
Peso recipiente más C.R. seco	240.6	366.1

Tabla 13 Datos iniciales para calcular la gravedad específica y la porosidad

Los datos iniciales que se muestran en la tabla 15 se obtienen del ensayo en laboratorio de acuerdo a lo descrito en la norma I.N.V. E – 222 – 07. En esta norma se encuentran las expresiones matemáticas con las que relacionan los datos producto del ensayo.

En la tabla 15 se muestran los resultados de los cálculos realizados, en esta tabla, SSS se refiere a la condición del material: saturado superficialmente seco.

	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Peso SSS	199.6	303.2	
Peso Solidos	180.9	282.5	
Gs Aparente	2.2	2.2	2.2
Gs Nominal	2.8	2.7	2.7
Gs	2.4	2.4	2.4
Absorción	10.3	7.3	8.8

Tabla 14 Gravedad específica y Porosidad

El valor promedio de Gs de la tabla 15 se utiliza en ensayo de hidrometría y de permeabilidad.

4.3.ADICIÓN DE CAL Y CONCRETO RECICLADO

Al inicio se realizaron ciertos ensayos para determinar las características del suelo en estado natural. Se le realizó el ensayo de compactación para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima; Ensayo de Límites de consistencia o de Atterberg para determinar el límite líquido, plástico e índice de plasticidad; Ensayo de CBR para determinar resistencia a la penetración y porcentaje de expansión. El ensayo de compresión simple para obtener la capacidad de soporte y el ensayo de consolidación.

Para determinar el comportamiento de las mezclas, se realizaron los mismos ensayos que se le realizaron al suelo natural, de esta forma se puede evaluar como es el comportamiento del suelo en sus diferentes características.

4.3.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA

La muestra para los ensayos de cada mezcla se obtuvo siguiendo el mismo procedimiento que consistió en realizar la dosificación con los porcentajes establecidos de acuerdo al peso seco de suelo, esta mezcla se tamizaba a través del tamiz N° 40, se trabajan con aproximadamente 400 gramos de material que pase a través de ese tamiz.

Siguiendo el procedimiento en I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 125 – 07 se determinan los límites líquido, plástico e índice de plasticidad de cada dosificación.

- **Límite líquido:** Es la humedad que tiene un suelo amasado y colocado en la cazuela de Casagrande, cuando una ranura, que divide el suelo en dos mitades, se cierra en fondo aproximadamente 11 mm, tras haber caído 25 veces a desde cierta altura, con una velocidad de 2 golpes por segundo. En la

tabla xx se muestra un resumen de los ensayos, los resultados del ensayo para determinar el límite líquido.

Con los datos de la tabla 16 se realiza las curvas de fluidez correspondientes a cada dosificación y que muestran en la figura 43.

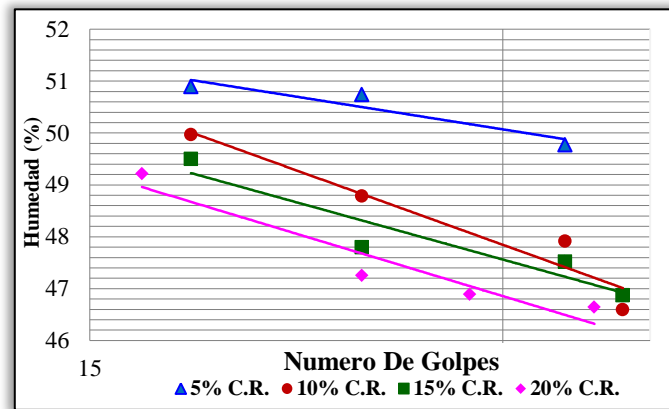


Figura 43 Curvas de fluidez para las dosificaciones

Dosificaciones	Numero De Golpes	Humedad %
Suelo Natural	27	53.20
	21	53.48
	15	55.10
Suelo natural + 5% concreto reciclado + 3% de cal	27	49.77
	21	50.74
	17	50.89
Suelo natural + 10% concreto reciclado + 3% de cal	29	46.59
	27	47.91
	21	48.79
	17	49.97
Suelo natural + 15% concreto reciclado + 3% de cal	29	46.87
	27	47.52
	21	47.80
	17	49.50
Suelo natural + 20% concreto reciclado + 3% de cal	28	46.64
	24	46.89
	21	47.25
	16	49.22

Tabla 15 Resultados del ensayo de límite líquido para las diferentes dosificaciones

Se observa que el límite líquido disminuye con el aumento de concreto reciclado al suelo. A pesar que los cambios son pequeños, la figura 43 muestra que el índice de plasticidad disminuye con el aumento de concreto reciclado al suelo natural. Esto significa que con el aumento del porcentaje de concreto reciclado el suelo se vuelve más vulnerable a cambio de humedad ya que con un cambio pequeño de humedad se estaría pasando al límite líquido. Al disminuir la plasticidad se disminuye la retención de agua lo que genera menor contracción de secado y la posibilidad de formación de grietas en el suelo. Las tablas 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17 en anexo C muestran los cálculos.

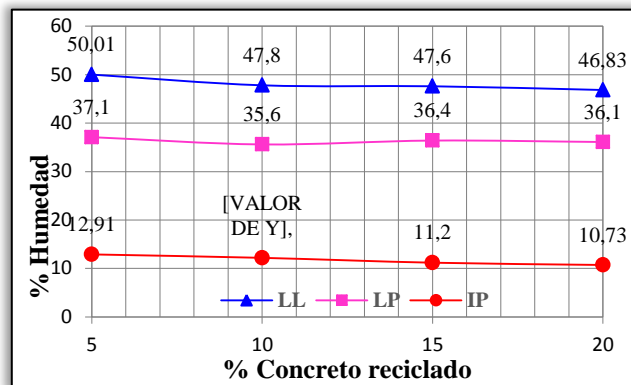


Figura 44 Variación de los límites de consistencia de acuerdo al porcentaje de C.R

4.3.2. DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMAS.

El suelo es mezclado con concreto reciclado adicionándole porcentajes de este material triturado. Los porcentajes son de 5%, 10%, 15% y 20% con respecto al peso seco. La figura 49 muestra las curvas de compactación correspondiente al ensayo de proctor modificado que se hizo a cada dosificación.

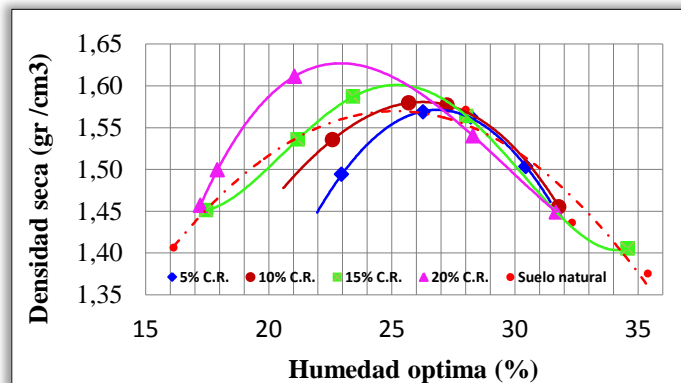


Figura 45 Curvas de compactación del suelo con diferentes porcentajes de Concreto Reciclado

Se puede observar en la figura 42 que los valores correspondientes a la densidad máxima seca difieren entre 1.57 gr/cm^3 y 1.63 gr/cm^3 . Además el rango de humedades óptima esta entre el 22% y 27%.

La densidad seca máxima aumenta cuando el porcentaje de concreto reciclado es mayor, existe un aumento notable de esta propiedad en la curva correspondiente al 20% y una reducción en el porcentaje de humedad con el que se adquiere esa densidad.

Porcentaje de concreto reciclado	Densidad seca máxima (g/Cm^3)	Humedad (%)
Suelo natural	1.57	25
5	1.575	27
10	1.58	26
15	1.6	24.5
20	1.628	22.8

Tabla 16 Resultados de compactación en las diferentes dosificaciones

Para detallar como es el comportamiento de la variación de la densidad seca máxima con respecto al porcentaje de concreto reciclado se grafica estas dos variables esto se muestra en la figura 46.

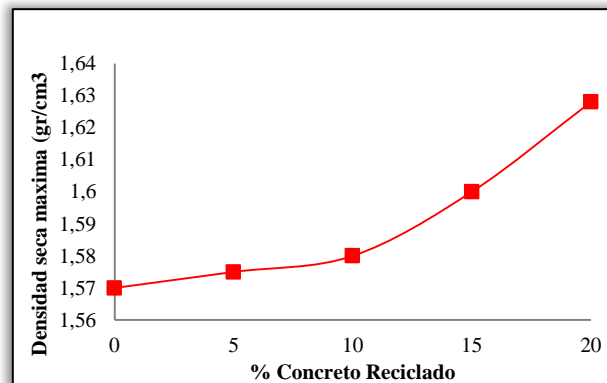


Figura 46 Variación de la densidad seca máxima de acuerdo con el % C.R

La densidad seca máxima incrementa con el aumento de concreto reciclado esto se debe a que las partículas del concreto son más densas y al aumentar el porcentaje el peso por volumen unitario es mayor. La humedad óptima con la que mezcla de suelo, cal y concreto también varía de acuerdo con los diferentes porcentajes de concreto reciclado que se adicionan. La figura 47 muestra como es esta variación.

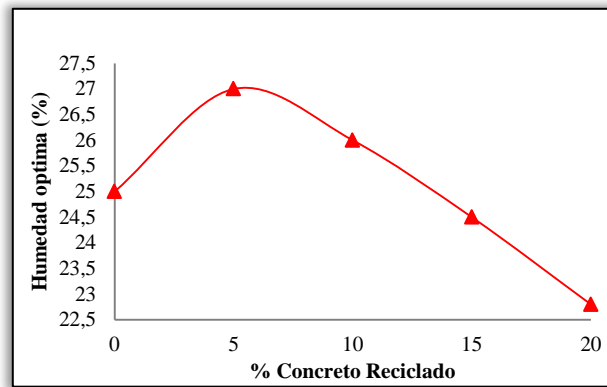


Figura 47 Variación de la Humedad óptima de acuerdo con el % C.R.

Se puede observar que humedad óptima de suelo natural, 25%, aumenta a 27% y a 26% cuando se adiciona el 5% y 10% de concreto reciclado respectivamente. Pero cuando se adiciona el 15% y 20% esta humedad disminuye a 24.5% y 22.8% respectivamente.

Las dos primeras variaciones se deben a la presencia de cal, esta hace que la humedad óptima aumente, además en estas dos primeras dosificaciones la influencia de cal en la humedad óptima es mucho mayor que la influencia de concreto reciclado.

En las últimas dos dosificaciones la humedad óptima disminuye, esto se debe que la hay más cantidad de concreto, la razón por la que después empieza a disminuir se debe a que tamaño de partícula del concreto reciclado es mayor al del suelo, esto hace que el agua tenga menor superficie que cubrir y por esta razón la humedad óptima baja. Por esta razón la humedad óptima de los agregados gruesos es menor que la de los agregados finos.

Las figuras 50, 51, 52 y 53 muestran en detalle cada curva de compactación para el 5%, 10%, 15% y 20% de concreto reciclado respectivamente.

Los datos de cada ensayo de proctor y los cálculos realizados se pueden ver en detalle en Anexos C en la tablas: 7.18, 7.19 7.20, 7.21 y 7.22 del anexo C.

4.3.3. RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN SIMPLE

Al aplicar un esfuerzo axial sobre una probeta de suelo, esta sufre pequeñas deformaciones unitarias que se van incrementando a medida se aumenta el esfuerzo, este ensayo tiene como finalidad determinar el esfuerzo máximo (q_u) que soporta la probeta antes de que ocurra la falla.

Al determinar la resistencia a compresión inconfiada, indirectamente también se puede determinar el esfuerzo contante (σ_3) con el resultado de resistencia a compresión inconfiada al dividir este resultado por dos.

Para evaluar la resistencia de cada dosificación a esfuerzos de compresión simple se tiene en cuenta los valores de la tabla 17. En la que se muestra los valores de densidad seca máxima y humedad óptima de cada dosificación. Cada probeta se remoldeó bajo estos dos parámetros.

La tabla 18 muestra las condiciones con las que se remoldearon cada probeta.

Dosificaciones	Ensayo de proctor		Probetas remoldeadas		% de las probetas respecto a los resultados de proctor	
	Densidad Máx.	Humedad Óptima	Densidad	Humedad	Compactación %	Humedad %
Suelo natural	1.57	25	1.55	24.65	98.7	98.6
Suelo + 5%C.R. + 3% Cal	1.575	27	1.54	26.59	97.8	98.5
Suelo + 10%C.R. + 3% Cal	1.58	26	1.52	25.05	96.2	96.3
Suelo + 15%C.R. + 3% Cal	1.6	24.5	1.55	23.74	96.9	96.9
Suelo + 20%C.R. + 3% Cal	1.628	22.8	1.58	22.51	97.1	98.7

Tabla 17 Características de las probetas remoldeadas

Durante el proceso de remoldear las probetas sin importar la dosificación de concreto reciclado se trató de estas tuvieran la densidad y la humedad lo más aproximado a los resultados de proctor. Esto se controló haciendo un proceso cuidado de compactación y evitando la pérdida de material y de humedad.

Lo que indica la tabla 18 son los resultados del ensayo de proctor modificado es decir la densidad máxima seca y la humedad óptima para cada una de las dosificaciones de concreto reciclado además de los resultados para el suelo natural. También se muestra la densidad y la humedad de las probetas luego del desmote del molde. En las últimas dos columnas de esta tabla se muestra con qué porcentaje de compactación y de humedad quedaron las probetas con respecto a los respectivos resultados de proctor.

Se observa que ninguna probeta quedó con compactada ni con la humedad al 100% de los resultados del proctor. Esto se debe precisamente a los procesos de laboratorio, alas pérdidas mínimas de material y la pérdida de humedad que aunque sean mínimas hacen que los valores difieran de los valores teóricos.

Con estas propiedades de las probetas se realizó el ensayo de compresión simple. La figura 48 muestra las curvas de esfuerzo y deformación unitaria para cada una de las dosificaciones.

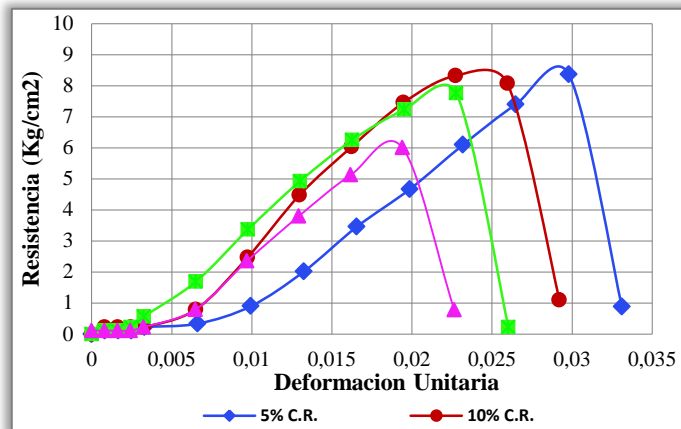


Figura 48 Curvas Esfuerzo vs Deformación Unitaria de cada dosificación

La figura 50 muestra las curvas de esfuerzo vs deformación unitaria en las cuales los picos máximos corresponden a la resistencia máxima a la compresión Inconfinada del suelo con cada dosificación de concreto reciclado.

Dosificación	Resistencia Compresión Inconfinada (Kg/Cm²)	Deformación Unitaria
Suelo natural	12.40	0.036
5% C.R.	8.58	0.0292
10% C.R.	8.40	0.0240
15% C.R.	7.93	0.0223
20% C.R.	6.20	0.0189

Tabla 18 Resultados del ensayo de compresión Inconfinada

Además de los resultados de la tabla 19, de las curvas de esfuerzo vs deformación de la figura 50, también se puede obtener los módulos de elasticidad de las probetas. El módulo de elasticidad corresponde a la pendiente de la curva cuando se encuentra en la zona elástica.

Módulo de elasticidad. En el diseño estructural de pavimentos, es muy importante que cada una de las capas que forman la estructura, tengan la capacidad de distribuir las cargas impuestas por el tráfico vehicular generando la menor deformación posible. Esto se logra teniendo altos módulos de elasticidad en una o dos capas de la estructura de pavimento, el tratamiento de suelos con cemento eleva considerablemente los módulos de elasticidad, generando una rigidez tal, que puede ser aprovechada en beneficio de una conveniente distribución de carga y buen desempeño de la estructura del pavimento durante la vida de diseño.

Para calcular los módulos de elasticidad se tienen en cuenta las curvas de esfuerzo vs deformación del ensayo de compresión Inconfinada que se muestran en la figura 51. Cada curva presenta en su parte inicial un incremento en la deformación unitaria a medida que aumenta el esfuerzo. El módulo de elasticidad corresponde a la pendiente

de esta parte lineal, para ello se trazó una línea tangente a estos puntos en cada curva. La pendiente de cada curva corresponde al módulo de elasticidad de suelo con cada dosificación. Todo esto se muestra en la figura 52.

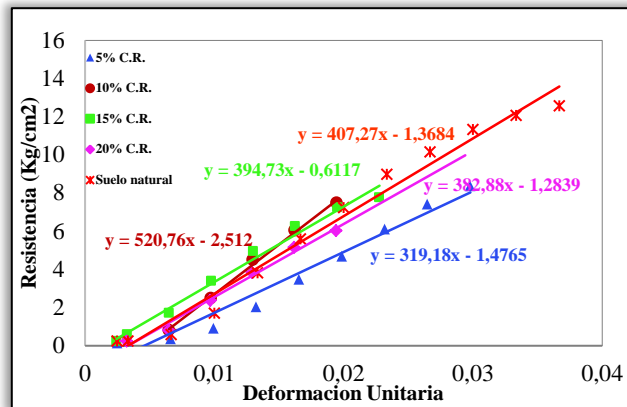


Figura 49 Módulo de elasticidad de cada dosificación

De las ecuaciones de cada recta se obtiene la pendiente, los resultados de los módulos de elasticidad se muestran en la tabla xx.

Dosificación	Resistencia Compresión Inconfinada (kg/cm2)	Deformación Unitaria (%)	Modulo Elasticidad (kg/cm2)	Modulo Elasticidad (Mpa)
Suelo natural	12.4	3.6	407.27	39.94
Suelo + 3% cal+5%CR	8.58	2.92	319.18	31.30
Suelo + 3% cal+10%CR	8.4	2.45	520.76	51.07
Suelo + 3% cal+15%CR	7.93	2.21	382.88	37.55
Suelo + 3% cal+20%CR	6.2	1.86	396.4	38.87

Tabla 19 Resultados de los módulos de elasticidad

De acuerdo con el módulo de elasticidad del suelo con cada porcentaje de concreto reciclado y cal la consistencia del suelo se clasifica de la siguiente manera (La guía, 2014)

Consistencia Del Suelo	Modulo Elasticidad (Mpa)
Muy blanda	<2.5
Blanda	2.5-5
Consistencia media	5-10
Rígida	10-20
Muy rígida	20-40
Dura	>40

Tabla 20 Consistencia del suelo de acuerdo con el modulo e elasticidad.

Los datos para generar las figuras 48 y 49 de muestran en las tablas 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26 en anexo C.

4.3.4. ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON LA CURVA DE TAYLOR

Cuando se somete un suelo cohesivo saturado a un incremento de carga, ocurre un traspaso de esta carga del agua a la estructura de suelo en función del tiempo. Inicialmente, ese incremento de carga exterior lo toma el agua debido a que, por una parte, es incompresible, y por otra, el suelo que se está trabajando presenta una baja permeabilidad.

La permeabilidad es una propiedad de los suelos de permitir el paso de agua a través de sus vacíos, y se mide a través del coeficiente de permeabilidad k , la facilidad con que pasa el agua a través del suelo, dependerá de los huecos o vacíos que tenga un suelo y si estos están intercomunicados; un suelo grueso tendrá más huecos que un suelo fino, por lo que tendrá mayor permeabilidad. No todos los suelos tienen la misma permeabilidad, pues esta depende de la forma, tamaño, composición y distribución de sus partículas. Por esta razón se evalúa esta propiedad del suelo cuando se han adicionado porcentajes de concreto reciclado.

Al montar la muestra de suelo en el equipo, de acuerdo con la norma I.N.V. E – 151 – 07 método A, se coloca una carga de 4kg esta carga produce un asentamiento primario, no se toman lecturas de deformación pues hay que esperar a que el suelo se estabilice y no presente hinchamiento, en caso tal de presentarse hinchamiento se debe colocar otra carga mayor. De lo contrario se toma lectura inicial de deformación a la cual el suelo no sufre deformaciones, para iniciar con el ensayo se coloca una carga superior, las lecturas de deformación se toman en tiempos determinados que se miran en detalle en las tablas de datos y cálculos en la parte de anexos.

Tal y como se describió en la sección 3.2.1.7 con los tiempo y las lecturas de deformación de este ensayo se grafica la curva de Taylor de consolidación.

Con las lecturas de tiempo y deformaciones se trazó la curvas de consolidación de cada curva se calcula el t_{90} , que es el tiempo al cual ha ocurrido el 90% del asentamiento. La figura 50 muestras las curvas de consolidación (a), (b), (c), (d) y (e) para el suelo natural y las dosificaciones del 5, 10, 15 y 20% de C.R respectivamente, de cada se obtiene el valor del tiempo para el que ha ocurrido el 90 de la consolidación. Este valor aparece en los cálculos de la tabla 21.

En la tabla 21 los valores de color rojo corresponde a los resultados del suelo justo al inicio del ensayo los valores de color azul corresponde a los resultados del final del ensayo que es cuando la lectura de deformación permanece constante.

DOSIFICACIÓN	PRESIÓN Kg/cm ²	ALTURA cm	H ₂ Prom. cm ²	t ₉₀ seg	Rel. VACÍOS	VARIACIÓN RELACIÓN VACÍOS	COEF. DE COMP cm ² /Kg	MODULO COMP cm ² /Kg	COEF. CONS. cm ² /Kg	PERMEABILIDA cm/seg
Suelo natural	4.341 8.683	1.86 1.84	0.854	126.15	0.74 0.72	0.020073	0.004624	0.002652	0.005739	1.52196E-08
Suelo + 5% C.R. + 3% Cal	2.171 4.341	1.86 1.85	0.862	110.976	0.76 0.75	0.013821	0.006367	0.003610	0.006584	2.37674E-08
Suelo + 10% C.R. + 3% Cal	2.171 4.341	1.87 1.85	0.866	86.4	0.77 0.75	0.014447	0.006656	0.003764	0.008496	3.1978E-08
Suelo + 15% C.R. + 3% Cal	2.171 4.341	1.87 1.85	0.864	72.6	0.78 0.76	0.014387	0.006628	0.003730	0.010093	3.76435E-08
Suelo + 20% C.R. + 3% Cal										

Tabla 21 Resultados del ensayo de Permeabilidad con Consolidometro

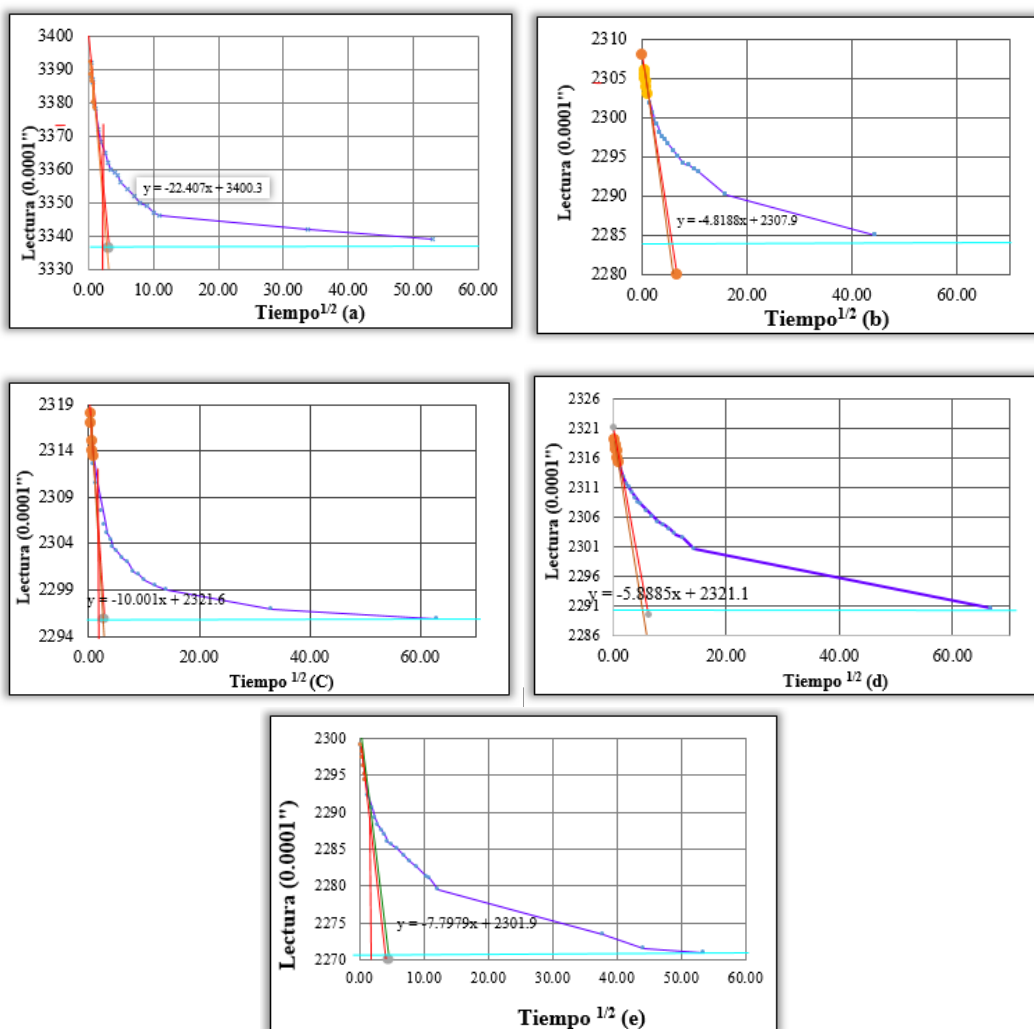


Figura 50 Curvas de consolidación de Taylor para el cálculo del t_{90}

Los resultados de relación de vacíos iniciales y con los de permeabilidad se realizan las curvas de variación de estas dos propiedades con respecto a la cantidad de concreto reciclado adicionado. Se observa que a medida que aumenta el porcentaje de concreto reciclado la permeabilidad aumenta esta se debe al aumento de en la reacción de vacíos, existen más espacios vacíos conectados entre sí que permiten que el agua circule con mayor facilidad. A pesar de este aumento, la permeabilidad en cada dosificación está en el rango 1.5×10^{-8} y 3.5×10^{-8} es un suelo impermeable.

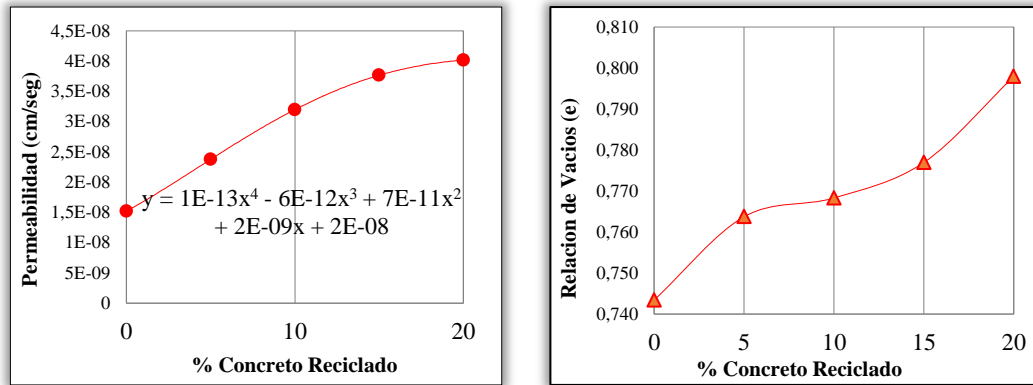


Figura 51 Variación de la permeabilidad y la relación de vacíos

Las tablas 7.27, 7.28, 7.29 y 7.30 muestran las lecturas tomadas y las curvas de Taylor que se generan.

Las tablas 22 y 23 muestran un resumen de resultados de los ensayos hechos en este trabajo de investigación tanto para el suelo natural, como para las diferentes dosificaciones de concreto reciclado y cal.

Dosificaciones	Compactación		Límites De Consistencia			Compresión Inconfinada		
	Humedad Óptima (%)	vd Max	Ll (%)	Lp (%)	Ip (%)	Resistencia Max (Kg/cm ²)	Deformación Unitaria (%)	Modulo Elasticidad (Kg/cm ²)
Suelo natural	25	1.57	53.2	34.3	18.92	12.4	3.6	4.0727
Suelo + 5% C.R . + 3% cal	27	1.575	50.1	37.1	13	8.58	2.92	3.1918
Suelo + 10% C.R . + 3% cal	26	1.58	47.8	35.6	12.2	8.4	2.45	5.2076
Suelo + 15% C.R . + 3% cal	24.5	1.6	47.6	36.4	11.2	7.93	2.21	3.8288
Suelo + 20% C.R . + 3% cal	22.8	1.628	46.83	36.1	10.73	6.2	1.86	3.964

Tabla 22 Resumen de resultados realizados

	permeabilidad con consolidometro				
Dosificaciones	Variación relación vacíos e	Coef. De Comp cm ² /Kg	Módulo Comp cm ² /Kg	Coef. Cons cm ² /Kg	Permeabilidad cm/Seg
Suelo natural	0.02007347	0.004623	0.002652	0.005738	1.52196E-08
Suelo + 5% C.R . + 3% cal	0.013821229	0.006367	0.00361	0.006583	2.37674E-08
Suelo + 10% C.R . + 3% cal	0.014447255	0.006655	0.003763	0.008496	3.1978E-08
Suelo + 15% C.R . + 3% cal	0.014386798	0.006627	0.003729	0.010092	3.76435E-08
Suelo + 20% C.R . + 3% cal	0.019302928	0.008892	0.004946	0.008457	4.18326E-08

Tabla 23 Resultados de principales de los ensayos realizados.

5. CONCLUSIONES.

El suelo utilizado para esta investigación se clasifico según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. (SUCS), como un limo de alta plasticidad MH. Se caracterizó este material encontrando algunas propiedades geotécnicas y se evaluó estas propiedades al adicionarle porcentajes de concreto reciclado (C.R.) y 3% de cal.

El aumento del porcentaje de concreto reciclado ocasiono en el suelo una disminución del límite plástico, haciendo que el índice de plasticidad también disminuya. Este comportamiento también se le atribuye al porcentaje de cal adicionado.

La humedad óptima y la densidad seca máxima se afectan con el contenido de concreto reciclado y cal, para las dos primeras dosificaciones 5 y 10% de C.R. la humedad óptima aumenta debido a la presencia de cal, pero a medida que el porcentaje de concreto reciclado aumenta, a pesar de la presencia de la cal, la humedad optima disminuye, debido a que se adicionan mayor porcentaje de partículas de mayor tamaño haciendo que el agua tenga menos área que cubrir.

El tamaño partículas de concreto reciclado corresponde a los de una arena esto hace que al aumentar el contenido de este material en el suelo este pierda cohesión, por esta razón la resistencia a la compresión inconfiada disminuye linealmente para cada porcentaje mayor de C.R.

Los módulos de elasticidad del suelo se obtuvieron de las pendientes de las curvas de esfuerzo deformación del ensayo de compresión inconfiada. Se encontró que para un porcentaje de 10% C.R. el modulo es mayor incluso a el modulo que le corresponde a la curva de suelo natural.

6. BIBLIOGRAFIA

- Agil, U. (2005). Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate in triaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE.
- Aguilar, A. (1997). Reciclado de materiales de construccion. *Residuos*.
- Barbudo Muñoz, M. A. (2012). *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Cordoba: Universidad de Cordoba.
- Braja M, D. (2001). *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica*. Thomson Editores.
- Chavez, A., Mejia, A., & Bernal , O. (2010). Análisis de informacion sobre el manejo y gestión de escombros a nivel nacional e internacional. 1-6.
- Chini, & Abdol. (2001). Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. *Journal of Material in Civil Engineering*, págs. 17-29.
- Chini, & Abdol. (2001). Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE., págs. 486-492.
- Dominguez, J. (2004). Hormigones reciclados: una alternativa sustentable y rentable. *Revista Cemento-Hormigon*, págs. 10-21.
- Foster, S. W. (1986). El concreto agregado como reciclado. *Concrete International*.
- Genera, J. (1976). Primer simposio Colombiano sobre Ingenieria de Pavimentos. SAI. 336-349.
- Huelle, R., & Blandon, B. (2004). Caracterización del material obtenido por reciclado de residuos cerámicos de construcción. *Tecnologia y Construccion IDEC*, Universidad Central de Venezuela, 20, págs. 9-22.
- Ingeominas. (2005). Estudio de microzonificacion sismica de Santiago de Cali.
- INVIAS. (2007). INV E - 124. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.
- INVIAS. (2007). INV E - 126. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.
- INVIAS. (2007). INV E - 128. Determinación de la gravedad específica de los suelos.
- INVIAS. (2007). INV E - 142. Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos (Ensayo modificado de compactación).
- INVIAS. (2007). INV E - 148. Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio).
- INVIAS. (2007). INV E - 151. Consolidación unidimensional de los suelos. 2007.
- INVIAS. (2007). INV E - 152. Compresión inconfiada en muestras de suelos.
- INVIAS. (2007). INV E 125. Determinación del límite líquido de los suelos.
- Janssen, G., & Put, J. (2005). Overview Regarding Construction and Demolition Waste in The Netherlands. Use of Recycled Materials. *Final reports of RILEM TC 198*, págs. 15-17.
- Jiménez Romero, J., Agrela Sainz, F., Lopez Aguilar, M., Ayuso Muñoz, J., & González Barrios, A. (Septiembre, 2006). Caracterización de una mezcla de áridos reciclados procedentes de la demolición de una cimentación para uso en terraplenes. 340-349.
- Jimenez, L., & Hernandez, M. (10 al 12 de Octubre de 2007). Reparación de pavimentos flexibles con materiales reciclados de construcción y demolición. *Congreso Internacional de Reciclaje Metanica*.
- Katz, A., Baum, H., & Nissim, I. (2005). Overview Regarding Construction and Demolition Waste in Israel. Use of Recycled Material. *Final Report of RILEM TC a98 URM*, págs. 13-14.

- Khalaf, F., & De Venny, A. (2004). Recycling of demolition masonry rubble as coarse aggregate in concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 16, págs. 331-340.
- Khaled, S. (1999). Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course. *Journal of Material in Civil Engineering*.
- Martínez, I. E., & Mendoza, C. J. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. *Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM*, págs. 151-164.
- Mercante, I. (2006). . Los residuos de Construcción en Mendoza. Estudio de Caso en Obra. *Tesis de Maestria Universidad Nacional de Cuyo*.
- Montejo, A. (2008). *Ingenieria de pavimentos* (Tercera ed., Vol. 1). Bogota: Universidad Catolica de Colombia.
- Nacional Lime Association. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL*. Nacional Lime Association.
- Nataatmadia, A. (2001). Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pág. 450-453.
- Nataatmadja, A. (2001). Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, 127, págs. 450-453.
- Natalini, M., Klees, D., & Tirner, J. (2007). Reciclaje y Reutilización de Materiales Residuales de Construcción y Demolición. *Departamento de estabilidad. Facultad de Ingenieria. Universidad de Noreste*.
- Olivares, J. (1967). Curso sobre suelo-cemento. 9-12.
- Park, T. (2003). Aplication of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, 129, págs. 558-563.
- Perez, I. (2007). Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. *Materiales de construccion CSIC INstituto Torroja*, 57, págs. 17-29.
- Poon, C. (2005). Overview Regarding Construction ans Demolition Wate in Hong Kong. Use of recyCled Materials . *Final Report of PILEM TC* , págs. 7-11.
- Sanchez, D., Ruiz, F., Ortiz , H., & Silva , M. (25 de Agosto de 2013). *¿De Donde Vienen y a Donde Van a Parar los Escombros en Cali? : La ruta de los escombros en Cali*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2013, de <http://www.elpais.com.co/elpais/graficos/infografia-ruta-escombros.cali>
- Sobhan,, & Khaled. (1999). Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course. *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, 11, págs. 124-130.
- Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. (s.f.).
- Vasquez , H., & Rivera, D. (2007). *Resistencia mecanica de un suelo fino-granular con diferentes porcentajes de adición de cal y cemento evaluado en diferentes tiempo de curado*. Medellin: Universidad de Medellin-Facultad de Ingenieria.
- Vasquez, E. (2005). Ovierview Regarding Construction and Demolition in Spain Use of Recycled Materials. *Final Report of RILEM TC 198*, págs. 25-26.